INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Septiembre 2011 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EVOLUCIÓN
Origen de la complejidad del ojo

ASTRONOMÍA
La tabla periódica de las estrellas

BIOCOMBUSTIBLES
Una promesa fallida

LA física DE LA inteligencia

El límite evolutivo de nuestro cerebro podría estar marcado por barreras de naturaleza física

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
FÍSICA DE LA INTELIGENCIA | EVOLUCIÓN DEL OJO | BIOCOMBUSTIBLES
SEPTIEMBRE 2011 N.° 420



6,00 EUROS

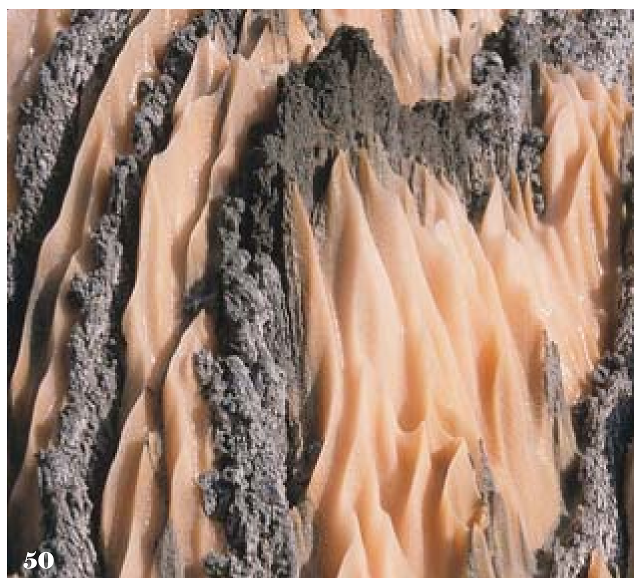
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Septiembre 2011, Número 420

68

ARTÍCULOS



4



50



55

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



¿Imponen las leyes de la física un límite a la inteligencia con base neuronal? Varios estudios recientes sugieren que las posibles vías evolutivas por las que nuestro cerebro podría continuar aumentando su capacidad de procesamiento tropezarían con obstáculos de naturaleza más profunda de lo que se pensaba. Fotografía de Adam Voorhes, Instituto de Neurociencia de la Universidad de Texas en Austin. Elementos gráficos por 2FAKE.

redaccion@investigacionyciencia.es



Abril 2011

SUBSIDIOS Y OBESIDAD

En su artículo «Combatir la obesidad» [Investigación y Ciencia, abril de 2011], David H. Freedman propone como solución modificar las conductas relativas a la alimentación. Se trata, sin embargo, de una medida inaplicable a 200 millones de personas. Freedman también parece mostrarse partidario de los programas gubernamentales, como los subsidios a la producción de frutas y verduras. Pero ¿de dónde procedería el dinero?

Hace ya decenios que en EE.UU. se subvenciona el maíz. Este cereal sirve de alimento económico para engordar reses y para elaborar jarabe de maíz alto en fructosa. La grasa de vacuno y el mencionado jarabe son ingredientes básicos de casi toda la comida rápida, incluidas las hamburguesas y las bebidas azucaradas, alimentos que Freedman reconoce como algunos de los que más contribuyen a la plaga de obesidad. Por tanto, al subsidiar el maíz, el Gobierno está contribuyendo a que la comida rápida resulte más barata que la alimentación sana. ¿Por qué no transferir esas subvenciones hacia otros cultivos más saludables?

Tanto las escuelas como los individuos con menos recursos se decantarían entonces por una alimentación más sana, ya que esta costaría menos que la comida basura. Aunque una solución real al problema de la obesidad exija sin duda cambios radicales en nuestra cultura, un buen lugar por donde comenzar sería dejar de subvencionar alimentos que nos hacen engordar de tal manera.

Gunnar Newquist
Programa de biología celular y molecular
Universidad de Nevada

VIAJES BUENOS Y MALOS

En el artículo «Uso terapéutico de alucinógenos» [Investigación y Ciencia, julio de 2011], Roland R. Griffiths y Charles S. Grob describen los beneficios terapéuticos de sustancias como la psilocibina y el LSD, así como algunos de los riesgos que entraña su uso. Me sorprende, sin embargo, la ausencia de debate sobre lo que quizá constituya su mayor peligro: el de promover falsas creencias en los pacientes. Según los estudios citados, hay sujetos que tras la experiencia afirman creer que «todo es Uno», que «Dios no pide nada de nosotros salvo recibir amor» y que profesan un desdén particular hacia una muerte inminente.

Yo mismo he experimentado esos estados, puesto que he consumido LSD y psiolocibina en el pasado. No solo sentí desprecio hacia la idea de la muerte, sino que en uno de esos viajes pasé media hora dudando si debería masticar y comerme mis propios dedos. Por fortuna, no lo hice. Aunque en general recuerdo con cariño aquellas experiencias juveniles, he de reconocer que aquellas visiones no eran reales ni verdaderas, sino el resultado de una sobreexcitación de ciertas regiones cerebrales por el efecto de una sustancia. Permitir que tales experiencias alteren por completo el enfoque y la filosofía de un paciente ante la vida no me parece ético en absoluto, sean cuales sean sus efectos positivos.

Consideremos por un momento que se hipnotizase a los pacientes para hacerles creer toda suerte de disparates y que, una vez despiertos, se les dejase vivir con esas creencias durante el resto de su vida debido a los efectos clínicos positivos de tales desvaríos. ¿Aprobaría un comité de ética un tratamiento así? Ciertamente, no lo creo. La situación guarda un estrecho parecido con el estudio sobre alucinógenos, donde el papel del médico que susurra mentiras al paciente lo desempeña la droga que aquel le administra.

Ben Haller
Departamento de biología
Universidad McGill

Responden Griffiths y Grob: *Nos alegramos de que Haller no se comiera los dedos. Sin embargo, no es de extrañar, puesto que los traumas inducidos por alucinógenos ocurren con muy poca frecuencia bajo las condiciones azarosas que suelen rodear a uso ilícito —contra el que, no obstante, advertimos— y son prácticamente inexistentes en las experiencias controladas. Haller tacha de «falsas» las conclusiones filosóficas de los voluntarios consumidores de psilocibina. Nosotros las consideramos no falsables, por lo que, como científicos, no nos posicionamos a favor ni en contra. Sí observamos, sin ánimo de emitir juicio alguno, que tienden a alinearse con las enseñanzas místicas características de las religiones. Por otra parte, la analogía con la hipnosis es falaz, puesto que en nuestras sesiones con psilocibina no introducimos ningún contenido explícito en la mente del paciente.*

Durante la sesión previa, se informa a los candidatos voluntarios de los posibles efectos de la psilocibina, entre los que se incluyen cambios duraderos en su filosofía y visión de la vida. Nuestros comités de ética han aprobado los estudios, lo que merece nuestro apoyo. La investigación ofrece un balance favorable entre beneficio y riesgo, y los estudios preliminares sobre pacientes y voluntarios sanos nos sugieren que los efectos positivos son sustanciales y prolongados.



Julio 2011

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



MEDIOAMBIENTE

Tortugas al rescate

Los europeos acabaron con multitud de animales a su paso por las islas Mauricio. En particular, provocaron la extinción del famoso dodo, en torno al año 1700. Quizá no son tan conocidos los efectos de su presencia en Ile aux Aigrettes, una isla mauriciana donde exterminaron a tortugas y escincos gigantes, y talaron los árboles autóctonos de ébano para conseguir leña.

En 1965, las 25 hectáreas de la isla, prácticamente deforestadas, fueron declaradas reserva natural. Sin embargo, a pesar de que se detuvo la tala de árboles, no mejoró la situación de los bosques de ébano, un tipo de árbol de lento crecimiento. ¿Por qué? Porque habían desaparecido los animales que se comían sus frutos y dispersaban sus semillas. Así pues, en el año 2000, un grupo de científicos trasladó a la isla cuatro tortugas gigantes del cercano atolón Aldabra, en las islas Seychelles. En 2009, se había introducido ya un total de 19 tortugas, que se paseaban por la isla, comiendo los grandes frutos y dejando tras de sí más de 500 áreas densamente cubiertas por los nuevos retoños. El equipo informó de los resultados obtenidos en el número de abril de *Current Biology*.

Al menos en el caso de esa pequeña isla, la repoblación natural parece haber funcionado. Y eso aviva la esperanza de que también funcionen otros proyectos de restauración ecológica en plena sexta extinción masiva de la historia de la Tierra. En Europa, grupos conservacionistas han recibido 3,1 millones de euros para comenzar a reintroducir bisontes, bovinos y caballos en zonas agrícolas «abandonadas», en lugares como la zona occidental de España o los Cárpatos. Los ecologistas han propuesto repoblar áreas de los EE.UU. con elefantes, sustituyendo así a los extintos mastodontes. En Holanda ya se ha construido un «parque del Pleistoceno» en Oostvaardersplassen, con caballos de Konik y bovinos de Heck que ocuparán el lugar de los bovinos y caballos salvajes, ya desaparecidos.

Por supuesto, los humanos no tienen muy buen historial en lo referente a interferir en los sistemas ecológicos naturales. La introducción del sapo de caña en Australia para acabar con otras plagas provocó un desastre en todo el continente. «No hay garantías cuando intentamos manipular la naturaleza», señala el ecólogo Mark A. Davis, de la Universidad Macalester, en Minnesota. Otros defienden que el hombre debería arreglar lo que ha estropeado. «No hay ningún lugar en este planeta en el que no hayan intervenido los humanos, ya es hora de empezar a diseñar soluciones», afirma Ove Hoegh-Guldberg, de la Universidad de Queensland.

—David Biello

PSICOLOGÍA

La Bella y las bestias

Si se muestra a un hombre la foto de una mujer atractiva, podría empezar a jugar al *blackjack* de forma más arriesgada. Si es una mujer real y hermosa la que le está mirando, podría cruzar la calle con el semáforo en rojo. Dichas exhibiciones de agilidad y bravuconería son el equivalente en el comportamiento humano de atributos físicos como la cornamenta en los animales. «Apareáte conmigo», es la señal que envían los hombres a las mujeres. «Puedo enfrentarme a los peligros para defenderte a ti y a los niños», parece que quieren decir.



Al menos eso afirma Lei Chang, de la Universidad China de Hong Kong. Con colaboradores de la misma universidad y de la de Hebei, también en China, Chang quiso averiguar si el armamento y la parafernalia militares tienen el mismo valor de seducción que la cornamenta, los cuernos y el comportamiento arriesgado, en cuanto a favorecer a los guerreros frente a los no combatientes en la competición por encontrar pareja. Los investigadores especularon también sobre la guerra. Al violar y saquear, los ejércitos se asemejan a los chimpancés en ataques sexuales intergrupales. ¿Podría ser que la guerra estuviera impulsada por la oportunidad que ofrece a los machos de fecundar a las hembras, quieran estas o no?

Para abordar esas cuestiones, Chang mostró a un grupo de hombres una serie de fotografías de mujeres y comprobó los efectos de dichas fotos sobre las actitudes de los mismos con respecto a la guerra y sobre sus procesos cognitivos relacionados con la contienda. Como infoman Chang y sus colaboradores en el número del 23 de marzo de *Personality and Social Psychology Bulletin* en línea, pidieron a los hombres que valorasen su acuerdo con respecto a diversas afirmaciones favorables a la guerra. Las respuestas demostraron una correlación positiva entre ver fotografías de rostros atractivos y aprobar afirmaciones que defienden la guerra. Esta correlación no se encontró al mostrar fotografías de rostros de mujeres no atractivas. Asimismo, no se observaron efectos relacionados con la guerra al mostrar a mujeres las fotografías de hombres, ya fuesen atractivos o no.

Los autores concluyen que cualquier relación entre la guerra y el apareamiento en los varones constituye, probablemente, un resto evolutivo de la época previa a *Homo sapiens*, lo cual explicaría por qué, desgraciadamente, siguen produciéndose violaciones y saqueos.

—Rebecca Coffey

GARY OMBLER, DORLING KINDERSLEY (*tortuga*), THOMAS FUCHS (*ilustración*)

BIOLOGÍA MARINA

Los autoestopistas más pequeños

Hay noticia de que al menos en dos cuencas oceánicas, la del Pacífico Norte y la del Atlántico Norte, pequeños fragmentos de plástico del tamaño de un confeti o menores se están acumulando en la superficie marina por decenas de miles. Se trata de restos de bolsas de la compra, vasos, botellas y otros residuos.

En 2010, un grupo de expertos informó de un misterio en la revista *Science*. A lo largo de una investigación de 22 años de duración sobre la acumulación de plástico en la zona noroccidental del océano Atlántico, no observaron ningún aumento en la cantidad de plástico, a pesar del incremento de la producción mundial de este material de 75 a 245 millones de toneladas durante el mismo período. ¿Dónde iba a parar todo ese plástico? Nuevos datos muestran que los microorganismos marinos podrían estar dándose un banquete con esos residuos.

En un viaje reciente al mar de los Sargazos, en la zona norte del Atlántico, un grupo de científicos de la Asociación pa ra la Educación Marina (SEA, por sus siglas en inglés), con sede en Woods Hole, Massachusetts, recogió trozos de plástico que, a simple vista, parecían lisos y limpios. Sin embargo, al utilizar un microscopio electrónico para examinar estas pequeñas astillas de un centímetro de longitud, hallaron un mundo nuevo. «Descubrimos que estaban cubiertas de microorganismos», explica Tracy Mincer, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole. Es más, observaron microorganismos que se hundían en la superficie del plástico, creando un orificio que doblaba su diámetro. «Parecían brasas que se hundían en la nieve», añade.

Mincer advierte que esos resultados son todavía preliminares, pero si pudiesen confirmarse constituirían la primera prueba de que los microorganismos marinos pueden degradar el plástico vertido en el mar. Si bien se ha demostrado la capacidad de las bacterias de digerir el plástico en el entorno cálido, húmedo y rico en nutrientes de los vertederos en tierra, la superficie del océano se ha considerado durante mucho tiempo un lugar demasiado inhóspito para que se produzca la biodegradación. Es fría, turbulenta y, sobre todo en el mar de los Sargazos, carece de nutrientes.

Para Kara Lavender Law, de la SEA, resulta esencial realizar nuevas investigaciones que ahonden en la descomposición del plástico en el mar. Ella es la autora principal del artículo publicado en *Science* que señaló por primera vez la desaparición del plástico.

—Amanda Rose Martinez



GARY BELL, CORBIS (*basura plástica*); MUSEO DE LA EVOLUCIÓN HUMANA (*brazalete*)

AGENDA

CONFERENCIAS

27 de septiembre
El genoma oscuro
Miguel Beato, Centro de Regulación Genómica
Ciclo «Desafíos del siglo XXI»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

EXPOSICIONES

Hasta el 25 de septiembre
La joya del Silo
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com



Hasta el 30 de septiembre
Hace 100 años el museo entrenó sede (1910-2010)
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

Imaginary. Una mirada matemática
Cosmocaixa
Barcelona
www.obrasocial.lacaixa.es

OTROS

13 de septiembre - Jornada
Por qué y cómo mojan los líquidos: lo que sabemos y lo que aún no entendemos
Coordinador: Manuel G. Velarde, UCM
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

Del 26 al 28 de septiembre - Congreso
De árabes a moriscos (711-1616): Una parte de la historia de España
Biblioteca Viva de al-Andalus
Córdoba
www.bibliotecavivadeal-andalus.org

Del 27 al 29 de septiembre - Congreso
Restauración forestal
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (UPM)
Madrid
www.restoringforests.net

ENFERMEDADES INFECCIOSAS

El VIH y el sarampión

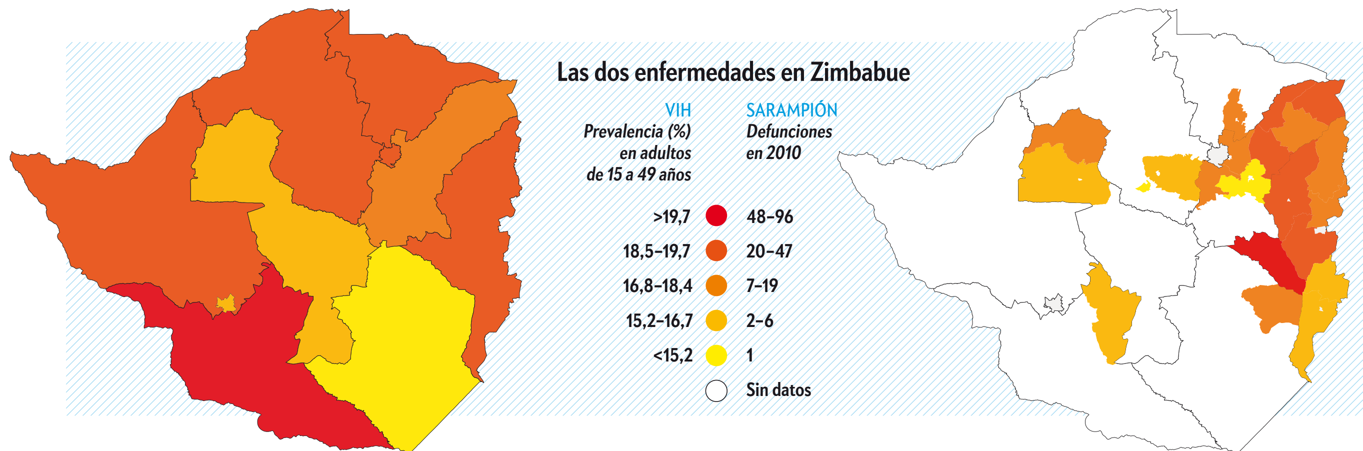
El sarampión ha sido prácticamente erradicado en el mundo desarrollado, pero sigue cobrándose más de 160.000 vidas al año en los países en desarrollo. El África subsahariana ha sufrido mucho en los últimos años. Un brote surgido en 2009 en Zimbabue afectó a 8000 personas y mató a 517. Algunos denuncian los escasos esfuerzos realizados para vacunar a la población, pero el verdadero culpable podría ser el VIH.

Los niños con VIH no responden bien a la vacuna del sarampión, ni siquiera al recibir una segunda dosis a los nueve meses, como recomienda actualmente la Organización Mundial de la Salud (OMS). Un estudio de 2008 realizado en Malawi encontró que la dosis adicional solo aumentaba la inmunidad al sarampión hasta un 64 %. Y lo que es peor, un estudio realizado en 2009 en Kenya reveló que solo el 33 % de los niños infectados con VIH que habían sido vacunados contra el sarampión después de nacer mantenían los anticuerpos del virus a la edad de cinco años. «La inmunidad al sarampión suele durar diez años y, a menudo, toda la vida», afirma William Moss, investigador de la Universidad Johns Hopkins que estudia el VIH y el sarampión en Zambia.

Las consecuencias para los esfuerzos de inmunización son graves. El plan de vacunación actual resulta inadecuado para países con altos niveles de VIH, afirma Anna Nilsson, inmunóloga del Instituto Karolinska de Suecia y coautora de un artículo sobre el sarampión y el VIH aparecido en marzo en *PLoS Pathogens*. El enfoque tradicional consistía en administrar la misma vacuna a todos los niños de una determinada edad. Sin embargo, existe un grupo de niños muy vulnerables que necesitan una atención especial. Más de dos millones de niños del África subsahariana son portadores del VIH.

Afortunadamente, los niños infectados por el VIH pueden desarrollar la inmunidad al sarampión si reciben terapia antirretroviral antes de la vacunación. Cuando los niños infectados por el VIH de cinco años de edad del estudio de Kenya fueron vacunados de nuevo, seis meses después de un tratamiento con antirretrovirales, su inmunidad al sarampión aumentó hasta el 78 %. El grupo de Nilsson descubrió que el tratamiento de antirretrovirales en los niños infectados por el VIH protege un tipo de célula inmunitaria que mejora la respuesta a la vacuna. La OMS está trabajando para favorecer el acceso a los antirretrovirales. Ahora cuentan con un nuevo incentivo para ello.

—Erica Westly



VIDA SALVAJE

El gato, rey de la jungla de asfalto

Quien haya tenido un gato al que se permita salir de casa sabe que suelen desaparecer durante horas y, a veces, días enteros. ¿A dónde van? La pregunta reviste interés también para los conservacionistas, que estudian el impacto de estos animales sobre las poblaciones salvajes. Expertos de la Universidad de Illinois y de la Encuesta sobre Historia Natural de Illinois colocaron transmisores de radio a 18 gatos domésticos y 24 gatos asilvestrados en la zona suroriental de Champaign-Urbana y rastrearon sus movimientos siguiéndolos con camiones o a pie durante más de un año.



El estudio, publicado en *Journal of Wildlife Management*, muestra que los gatos domésticos son bastante perezosos: pasan el 80 % del tiempo descansando. Dedican otro 17 % a actividades reposadas (acicalarse) y solo el 3 % a actividades que suponen un fuerte ejercicio físico (caza). Los gatos sin dueño descansan solo el 62 % del tiempo y dedican el 14 %, sobre todo por la noche, a conductas muy activas. Los gatos asilvestrados se desplazan mucho más lejos de lo que se esperaba: a lo largo de zonas de hasta 5,5 kilómetros cuadrados. Los domésticos, en cambio, permanecen en un área media de unos 0,02 kilómetros cuadrados en torno a su hogar.

El comportamiento de estos pequeños felinos guarda semejanza con el de sus parientes de mayor tamaño. Mantener una zona de patrulla es un comportamiento intrínseco de los felinos. Y también la proximidad a los humanos, ya que facilita el acceso a los alimentos (los jaguares de Iberoamérica se mueven discretamente a través de grandes áreas en las que viven humanos). Es parte de la naturaleza felina vivir en el límite entre las tierras salvajes y las habitadas por el hombre.

—Madhumita Venkataramanan

FUENTES: OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LA ONU; PROGRAMA CONJUNTO DE LA ONU SOBRE EL VIH/SIDA; OMS (*mapas*); FAHMI SANI PHOTOGRAPHY, GETTY IMAGES (*gato*)

ASTROPARTÍCULAS

A vueltas con la materia oscura



Un cúmulo de galaxias dominado por materia oscura.

La característica principal de la materia oscura suele resumirse diciendo que nadie sabe lo que es, porque nadie la ha visto. La primera cláusula es irrevocable: un gran número de partículas hipotéticas se erigen como candidatas a componer esta sustancia misteriosa. En cuanto a si alguien la ha visto o no, parece que los expertos se encuentran más divididos que nunca.

La controversia gira en torno al experimento DAMA, un detector de partículas subterráneo localizado en el Laboratorio Nacional de Gran Sasso, en Italia. A juicio de algunos, DAMA lleva años detectando partículas de materia oscura. Los críticos, por su parte, sostienen que DAMA no ha sido tan claro en la publicación de sus datos y se muestran escépticos al respecto.

Más que en los datos en sí, el problema reside en su interpretación. Si la materia oscura inunda nuestra galaxia, como parecen indicar las observaciones astronómicas, la detección de esta sustancia desde la Tierra debería exhibir una modulación anual provocada por la órbita del planeta; algo así como un flujo y reflujo estacional de partículas de materia oscura. Durante más de diez años, DAMA ha detectado perturbaciones que se ajustan a ese patrón. «Creo que todo el mundo está de acuerdo en que detectan una señal», afirma Mario Livio, del Instituto Científico para Telescopios Espaciales de Baltimore. «La cuestión es: ¿de qué se trata?»

El pasado mes de abril, la colaboración XENON100 (otro detector, localizado también en Gran Sasso) publicó ciertos resultados que parecían descartar que los indicios referidos por DAMA se debiesen a la detección de materia oscura. Sin embargo, en mayo, el experimento CoGeNT, emplazado en Minnesota, anunció que detectaba perturbaciones estacionales similares a las referidas por DAMA. Los resultados son aún preliminares, pero CoGeNT podría convertirse en el aliado que DAMA ha necesitado durante mucho tiempo. Según Juan I. Collar, físico de la Universidad de Chicago y portavoz de CoGeNT: «Puede que los investigadores de DAMA estén equivocados y puede que tengan razón. Nosotros tenemos que permanecer neutrales», afirmó. «Me encuentro atrapado entre creyentes e incrédulos.»

—John Matson

¿QUÉ ES ESTO?

Gracias a un hallazgo casual realizado por granjeros de la Mongolia Interior, los científicos han descubierto que las mayores arañas actuales que tejen telas son unos 130 millones de años más antiguas de lo que se pensaba. En el año 2005, unos granjeros chinos que cavaban en una zona de antigua ceniza volcánica descubrieron el fósil que puede verse a la derecha, el mayor fósil de araña hallado hasta el momento y uno de los mejor conservados. Paul A. Selden, director del Instituto de Paleontología de la Universidad de Kansas, y sus colaboradores revelaron en el número en línea de abril de *Biology Letters* que el cuerpo de la araña hembra, miembro del género *Nephila* y con 165 millones de años de antigüedad, mide unos dos centímetros y medio de longitud y sus patas casi ocho centímetros. «Es posible distinguir detalles sumamente precisos, como los tricobotrios, pelos sensoriales que las arañas usan para detectar las vibraciones del aire», afirma Selden. *—Ann Chin*



X-RAY: NASA/CXC/M. MARKEVITCH ET AL.; OPTICAL: NASA/STSCI, MAGELLAN/U. ARIZONA/D. CLOWE ET AL.; LENSING MAP: NASA/STSCI, ESO WFI, MAGELLAN/U. ARIZONA/D. CLOWE ET AL. (*cúmulo*); PAUL A. SELDEN (*araña*)

ASTROFÍSICA

El misterio de un Sol inmaculado

La dinámica de los flujos de plasma en el interior del astro explica la inusitada ausencia de manchas solares observada durante los últimos años

A pesar de su aparente inmutabilidad, el Sol exhibe una rica variedad de fenómenos dinámicos que abarcan todo tipo de escalas temporales y espaciales. La mayor parte de ellos se relaciona con la evolución del campo magnético solar y su interacción con el plasma, la «sopa» de partículas dotadas de carga eléctrica y a muy altas temperaturas que componen el astro. Los violentos destellos solares y las eyecciones de masa, por ejemplo, tienen su origen en los cambios locales del campo magnético. Por otro lado, dado que el campo magnético actúa como una guía para el viento solar (las corrientes de partículas que emanan de la estrella), sus cambios globales afectan a la naturaleza del viento solar y al entorno interplanetario.

Toda actividad magnética del Sol se refleja en el aspecto y la cantidad de manchas solares. Estas aparecen en las regiones en las que existe un campo magnético muy intenso, ya que entonces se suprime la transferencia de calor hacia la superficie y se reduce la emisividad del plasma. Las machas solares constituyen la manifestación superficial de los tubos de flujo magnético, los cuales emergen desde las profundidades de la zona de convección —la región del Sol en la que la transferencia de calor se realiza a través del movimiento del plasma—. A su vez, dichos tubos de flujo tienen su origen en los grandes «cinturones» de campo magnético que se generan como consecuencia de que, en el Sol, las diferentes capas de plasma no rotan de manera uniforme, sino a velocidades distintas, un fenómeno denominado rotación diferencial. Ello deforma la componente dipolar del campo magnético (en esencia, las líneas de campo que nacen en un polo y van a morir al otro), enrollándola alrededor del eje de rotación.

Desde hace tiempo se sabe que el número de manchas solares exhibe una sucesión de máximos y mínimos que obedecen a un ciclo de unos once años. Un ciclo solar típico puede describirse como una sucesión de los siguientes fenómenos: la producción de cinturones de campo magnético a medida que la rotación diferencial deforma la componente dipolar del campo magnético; el transporte de estos cinturones desde latitudes intermedias hacia el ecuador como consecuencia de los flujos meridionales de plasma —un movimiento sistemático del plasma hacia los polos, el cual se ha observado en la superficie y cuyo retorno hacia el ecuador se cree que tiene lugar en las profundidades de la zona de convección—; la erupción y progresiva desaparición de las manchas solares a lo largo de este viaje y, por último, debido al decaimiento del campo magnético de estas, la cancelación e inversión de la componente dipolar del campo magnético solar (la inversión de los polos magnéticos del astro). A partir de ese momento, da comienzo el ciclo siguiente.

Dado que el proceso de cancelación e inversión del campo magnético ocurre de manera gradual, los cinturones de campo magnético de los que provienen las manchas de un ciclo siempre coexisten con los cinturones que originarán las



Una instantánea del campo magnético (*en diferentes tonalidades*) en la zona de convección al comienzo del ciclo. Se observan los cinturones de campo magnético (*dorado*), los cuales serán transportados por el flujo meridional (*negro*) hacia el ecuador y de los que emergerán las manchas solares a medida que el ciclo progrese. Debido a la naturaleza turbulenta y la rotación diferencial de la zona de convección, es allí donde tiene lugar el ciclo magnético. Más allá de esa región da comienzo la zona de radiación (donde la transferencia de energía térmica se produce mediante la absorción y emisión de luz; *amarillo*). El núcleo, la zona donde las reacciones de fusión nuclear generan la energía del astro, se halla aún más profundo (*no se muestra*).

CORTESÍA DEL AUTOR

manchas del ciclo siguiente, como si de un objeto fabricado en una cadena de producción en serie se tratase. Ese intervalo de tiempo en el que un ciclo se encuentra en sus últimos estertores y el siguiente está comenzando se conoce como mínimo solar, ya que se caracteriza por una gran cantidad de días sin manchas solares.

¿Dónde estaban las manchas solares?
El ciclo de once años modula toda la actividad del astro, motivo por el que entenderlo y predecirlo constituye una de las metas principales de la física solar. Hasta ahora, la comunidad se había concentrado en predecir los períodos de mayor actividad; sin embargo, durante el último mínimo fuimos testigos de un fenómeno del todo inusual: la ausencia casi total de manchas durante casi tres años y los valores más bajos del campo magnético polar durante un mínimo. Se trataba de la segunda vez en un período de más de cien años que se observaba un mínimo de esta naturaleza. A su vez, ello redujo la irradiancia solar y batió todos los mínimos de velocidad, energía y densidad del viento solar.

En medio de la sorpresa e incertidumbre, nuestro grupo de investigación decidió aprovechar el desarrollo reciente de un modelo mejorado del ciclo solar para estudiar las causas que pudieran haber originado dicho mínimo. De todos los procesos que toman parte en el ciclo (convección, rotación diferencial, flujo meridional y erupción de manchas solares), el de mayor variabilidad es el flujo meridional, motivo por el que decidimos estudiar el impacto de los cambios en su amplitud. Desafortunadamente, no existen observaciones del flujo meridional que abarquen más de un ciclo. Para salvar ese obstáculo, simulamos un conjunto de ciclos variando el flujo meridional de manera aleatoria, lo cual nos permitió investigar bajo qué condiciones se producía un mínimo solar profundo.

Nuestras simulaciones, cuyos resultados se publicaron el pasado marzo en *Nature*, mostraron que un flujo meridional relativamente rápido durante la primera mitad del ciclo solar y cuya velocidad se redujese tras pasar el máximo daba como resultado a un mínimo solar de larga duración. La razón se debe a que un flujo meridional rápido reduce el tiempo del que la rotación diferencial dispone para generar los cinturones de campo que, a la postre, originan las manchas solares. Si, además, el flujo reduce su velocidad después del máximo (el punto a partir del cual se empiezan a generar los cinturones que darán lugar al siguiente ciclo), se demora la llegada del siguiente período de actividad. Por tanto, la prolongada ausencia de manchas solares puede explicarse como el resultado de un ciclo que terminó prematuramente y otro cuyo comienzo se demoró en llegar.

El reciente mínimo extendido nos ha demostrado que las predicciones del ciclo solar no pueden limitarse a su amplitud, sino que es necesario también predecir su duración y comienzo, ya que estas tres propiedades se encuentran íntimamente conectadas. El problema radica en que unas predicciones fiables requieren mediciones a largo plazo del flujo meridional, las cuales resultaban muy difíciles de obtener con anterioridad a 1996. Por fortuna, los enormes avances en las técnicas de observación y en la calidad de las simulaciones a lo largo de los últimos diez años auguran un futuro brillante a nuestro entendimiento y capacidad de predicción del ciclo magnético solar.

—Andrés Muñoz Jaramillo
Centro Harvard-Smithsoniano de Astrofísica
Cambridge, EE.UU.

MEDICINA Y SALUD

Revoltijo de ratones

Múridos que representan la diversidad genética humana para estudiar mejor las enfermedades

Research Triangle Park, Carolina del Norte. Los ratones, repartidos entre 2000 jaulas, muestran una gran variedad: blancos, negros o marrones; algunos son gordos, otros muy delgados; algunos tienen colas curvadas, unos se acurrucan en las esquinas y otros corretean en círculos. Estos ejemplares de la Universidad de Carolina del Norte (UCN), en Chapel Hill, que están esperando a ser trasladados a nuevas instalaciones, no son mutantes deficientes. En realidad, constituyen un nuevo recurso, muy valioso: las cepas de ratón con mayor diversidad que se han utilizado hasta ahora en los laboratorios. Debido a que reflejan mejor la variación genética de los humanos, podrían ser la clave para entender algunas de las enfermedades más comunes y complejas de nuestros días.

Los ratones no presentan diferentes etnias, como los humanos, pero cuentan con una diversidad genética mucho mayor. Los ratones de laboratorio tradicionales poseen un número limitado de alelos (las distintas versiones de un mismo gen). Su ADN contiene solo el 30 por ciento de la diversidad de alelos del genoma de la especie; es decir, solo albergan unas pocas formas de cada gen, en comparación con los ratones silvestres. Sin embargo, los genetistas han comenzado a criar una nueva población de ratones que abarca el 90 por ciento de la diversidad del genoma del ratón y que equivale a las variaciones naturales del genoma humano.

La idea de crear estos grupos de ratones tomó forma en una conferencia de 2001, cuando un puñado de científicos comenzó a quejarse de la falta de progresos en el estudio de enfermedades provocadas por la acción conjunta de numerosos genes. En esas complejas enfermedades, entre ellas el cáncer y la diabetes, los estudios genéticos con ratones tradicionales, mediante el silenciamiento de un gen u otro, arrojan escasos resultados. «Necesitábamos una nueva población de animales para dar un empuje a este campo», afirma David W. Threadgill, genetista de la Universidad estatal de Carolina del Norte y uno de los directores del proyecto. Así pues, los investigadores esbozaron un plan: cruzar ratones de cepas genéticamente diversas para obtener cientos de variedades reproducibles, con una amplia gama de características físicas y comportamientos. Esos ratones tendrían combinaciones de rasgos que los animales de laboratorio actuales no poseen. Se calculó que bastarían ocho cepas fundadoras para conseguir la diversidad deseada de alelos, a la vez que se mantenían unas dimensiones manejables para la computación y la gestión del proyecto.



Múltiples variedades: **Los ratones criados en el proyecto *Collaborative Cross* muestran muchos rasgos distintos. El proyecto intenta reproducir la diversidad genómica de los humanos para obtener mejores modelos de las enfermedades complejas.**

El proyecto, denominado Colaboración para el cruzamiento (CC, de *Collaborative Cross*) fue más fácil de imaginar que de llevar a la práctica. Un intento anterior de crear líneas de ratones genéticamente diversas mediante la inducción química de mutaciones perdió su financiación debido a la reducida demanda de ejemplares, así que los genetistas no estaban dispuestos a desperdiciar cincuenta millones de dólares, la cifra inicial del proyecto. «Si los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) invierten mucho dinero y luego no se consiguen grandes resultados, la credibilidad se resiente», afirma Alan D. Attie, genetista de la Universidad de Wisconsin-Madison que no participa en el proyecto.

Aun así, Gary Churchill, genetista del Laboratorio Jackson de Bar Harbor, Maine, comenzó a criar las ocho cepas iniciales en su laboratorio; entre ellas se incluían tres cepas derivadas de ratones silvestres que proporcionarían el setenta y cinco por ciento de la diversidad genética del proyecto. Los colaboradores pronto consiguieron suficiente financiación como para comenzar la cría en serio, primero en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Tennessee, y después en las universidades de Carolina del Norte, Tel Aviv y Australia Occidental en Perth. Actualmente, casi ha finalizado la cría de las primeras cepas; el equipo espera tener las cincuenta líneas iniciales antes del fin de 2011 y de trescientas a quinientas líneas antes del fin de 2013. Y todo ello con unos costes que se acercan a la décima parte de la estimación inicial.

«Pero no podemos quedarnos con los brazos cruzados», afirma Churchill; así que ha empezado, junto con otros, a utilizar las líneas obtenidas, denominadas pre-CC, para demostrar la utilidad de los ratones en estudios que van desde fisiología básica a la predisposición de los animales a las enfermedades infecciosas. Los primeros resultados están despertando interés en diversas agencias federales. En septiembre de 2009, los Estados Unidos otorgaron a la UCN una financiación de 8,6 millones de dólares. El objetivo: construir un centro para el estudio de la genética de las enfermedades psiquiátricas humanas mediante el empleo de ratones del proyecto CC.

Algunos científicos ajenos al proyecto también sienten atracción por el mismo. Samir Kelada, un investigador posdoctoral en el laboratorio de Francis Collins, director de los NIH, ya ha utilizado unos

CORTESÍA DE BRYNN H. VOY *Universidad de Tennessee*

160 ratones pre-CC para estudiar interacciones del entorno genético que provocan el asma alérgico. Algunos de esos ratones siguen sanos después de recibir grandes dosis de alérgenos del asma, mientras que otros estornudan incluso antes de empezar el ensayo. «Tal es su extraordinaria diversidad», afirma Kelada.

Los directores del proyecto CC esperan que más investigadores como Kelada utilicen este recurso de libre disposición. A no ser que los fundadores del proyecto, esencialmente genetistas, puedan convencer a los fisiólogos y bioquímicos de que examinen los ratones, «el impacto será muy limitado», afirma Attie. Threadgill está de acuerdo: «No hay ninguna duda de que debemos atraer a expertos en fisiología y en el comportamiento. Deseamos que sea un recurso a disposición de la comunidad».

—Megan Scudellari
Periodista científica especializada en medicina y salud.

GEOLOGÍA

Viaje al manto terrestre

Se cumple el 50 aniversario del primer intento de perforar el manto terrestre. Lo que una vez fue ciencia ficción, es ahora posible

Durante más de un siglo, obtener muestras del manto terrestre ha sido una de las ambiciones de mayor envergadura para las ciencias de la Tierra. En 1909, el meteorólogo croata Andrija Mohorovičić observó que las ondas sísmicas que viajaban por debajo de los 30 kilómetros de profundidad se propagaban a mayor velocidad que las que viajaban por encima. El fenómeno indicaba un cambio radical en la composición y las propiedades físicas de las rocas. Había descubierto el límite superior del manto terrestre, hoy conocido como la discontinuidad de Mohorovičić o, simplemente, «Moho». Este límite marca la frontera a partir de la cual se extiende el interior de la Tierra, desde la base de la corteza (entre 30 y 60 km bajo los continentes y a tan solo 6 km bajo la corteza oceánica, de menor espesor) hasta el núcleo, 2890 km por debajo.

Perforar y tomar muestras directamente del manto supondría para los científicos un tesoro de valor incalculable, equiparable al de las rocas lunares durante la misión Apolo, que permitiría ahondar en el origen y la evolución de nuestro planeta. Pero este objetivo ha resultado ser difícil de alcanzar, quizá más difícil que llegar a la Luna. Hasta ahora, la corteza oceánica solo ha podido perforarse hasta una profundidad de 2 km, es decir, un tercio del camino hasta el manto. El primer intento de perforación del manto, el «proyecto Mohole», fracasó, al naufragar en un barrizal geopolítico.

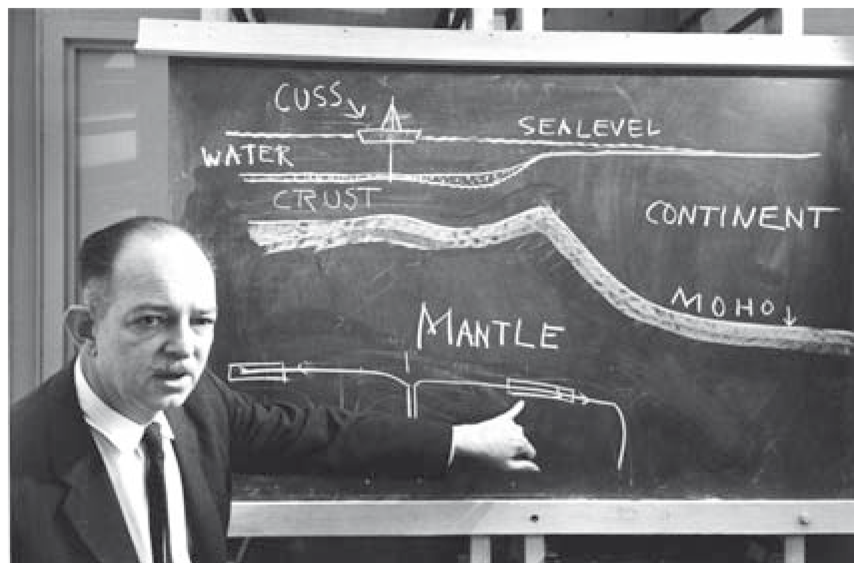
En la actualidad, se está planificando una nueva campaña Mohole, gracias a una tecnología más avanzada, un mejor conocimiento del sustrato rocoso que yace en profundidad y una mayor conciencia del reto que supone perforarlo. En los próximos años, se llevarán a cabo campañas geofísicas en tres puntos del océano Pacífico. Uno de ellos será el punto elegido para el primer sondeo profundo hasta el manto. La perforación hasta el manto supondrá una estancia en barco prolongada y presentará un coste elevado; será mucho más caro que un sondeo actual al uso, aunque mucho más barato que lanzar una nave a la Luna. Pero si se obtiene la financiación y continúa el compromiso científico, la perforación podría comenzarse dentro de diez años y concluirse en quince.

Una vieja idea

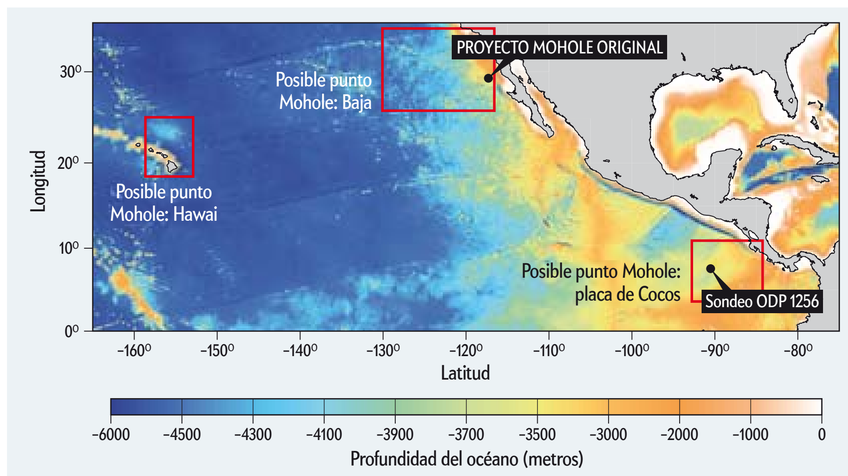
Los primeros planes diseñados para realizar un sondeo hasta el manto fueron urdidos a finales de la década de los cincuenta por un grupo de destacados científicos de la posguerra bajo pretexto de la Sociedad Miscelánea Americana, un grupo de carácter informal constituido por miembros de la Academia Nacional de Ciencia estadounidense, en ocasiones referido como un «club de bebedores». La idea llegó por primera vez de la mano de Harry Hess, uno de los fundadores de la teoría de la tectónica de placas, y Walter Munk, pionero en el estudio de la capacidad de los vientos para generar corrientes oceánicas y el primero en explicar por qué la Luna le oculta una cara a la Tierra. Frustrados por el hecho de que muchos consideraran sus propuestas científicas interesantes pero pedestres, quisieron embarcarse en un proyecto más ambicioso e innovador.

Durante un almuerzo en casa de Munk, en La Jolla, California, un sábado por la mañana en abril de 1957, tuvieron la idea del proyecto Mohole: un plan para perforar por primera vez toda la corteza terrestre y llegar hasta el manto superior.

En aquel entonces la incipiente industria de la prospección petrolífera marina no había considerado todavía la posibilidad de llevar a cabo una perforación en aguas profundas. El proyecto Mohole requería el desarrollo de nuevas técnicas



Harry Hess, uno de los fundadores de la teoría de la tectónica de placas, explica el proyecto Mohole.



Áreas candidatas para llevar a cabo un sondeo hasta el manto. Una de ellas incluye el punto de perforación del proyecto Mohole original. Otra incluye el área (sondeo ODP 1256) donde ya se ha perforado hasta la corteza inferior.

como el posicionamiento dinámico, que permitiría mantener un buque perforador en posición fija. El grupo fue financiado por la Fundación Nacional de Ciencia estadounidense; se utilizó el mejor barco disponible: el buque *CUSS 1*, bautizado con las iniciales de las petroleras que lo construyeron (Continental, Union, Shell y Superior). Cuatro años después de proponer el proyecto, se instalaron unos propulsores a un lado del *CUSS 1* con un sistema diseñado para que pudieran mantener el barco en un punto fijo.

En marzo y abril de 1961, los científicos obtuvieron el primer testigo procedente de la capa rocosa más superficial de la corteza oceánica o «basamento» en la isla Guadalupe, en el océano Pacífico oriental, gracias a las audaces e innovadoras labores de ingeniería de Willard Bascom y su equipo. Se extrajeron unos pocos metros de basalto enterrado bajo 3800 metros de agua y 170 metros de sedimentos, todo ello con un coste de 1,5 millones de dólares (equivalentes a 40 millones de dólares según su valor en 2009). La proeza fue descrita en un reportaje de la revista *Life* (14 de abril de 1961), cuyo autor era el novelista y oceanógrafo amateur John Steinbeck, que había estado a bordo del *CUSS 1* durante las primeras operaciones.

Aquel fue el único testigo oceánico obtenido por el proyecto Mohole. Tras la expedición, la gestión del proyecto cambió, se tomaron algunas decisiones desafortunadas sobre las técnicas de perforación que debían emplearse y los costes alcanzaron valores desorbitados. En 1966, el proyecto Mohole se vino abajo cuando el Congreso de los EE.UU. decidió dejar de financiarlo.

Por otro lado, el desarrollo del proyecto coincidió con una creciente aceptación de la teoría de la tectónica de placas. El interés por la formación y la evolución de la corteza oceánica estaba en pleno auge. El proyecto Mohole había demostrado que era posible realizar sondeos en el basamento oceánico. Este hecho favoreció la consolidación de una colaboración científica internacional para apoyar proyectos de perforación oceánica que se ha mantenido durante décadas. El Programa Integrado de Perforación Oceánica (IODP, por sus siglas en inglés) y sus predecesores, el Proyecto de Perforación del Mar Profundo (DSDP) y el Proyecto de Perforación Oceánica (ODP), constituyen la que podría considerarse la colaboración científica a largo plazo más próspera que se ha establecido en cualquier campo.

La frontera profunda

El manto alberga aproximadamente el 68 por ciento de la masa total del planeta. Teniendo en cuenta su gran volumen, resulta indispensable conocer con exactitud su composición y su variabilidad para comprender la formación y evolución de la Tierra. Prácticamente todo el material cortical de la superficie terrestre (el que compone el fondo oceánico y los continentes) procede originariamente del manto.

Existen fragmentos de manto que han sido emplazados tectónicamente en la superficie terrestre durante movimientos orogénicos de formación de montañas, donde afloran y son accesibles a los investigadores. Las erupciones volcánicas, además, emiten porciones de manto en forma de enclaves atrapados en la lava. Finalmente, la expansión del fondo oceánico ha transportado consigo otros fragmentos de manto hasta la base del océano. Estos fragmentos que han conseguido llegar a la superficie revelan que el manto está constituido por peridotitas, unas rocas compuestas por minerales ricos en magnesio y pobres en silicio como el olivino y los piroxenos. Por otro lado, y en concordancia con los datos sísmicos de campo lejano, ponen de manifiesto que la composición del manto no es homogénea, aunque su espectro composicional no se conoce todavía con precisión. Las muestras de manto de las que disponen los científicos han sido alteradas químicamente, bien durante los procesos de transporte hacia la superficie o bien por acción del agua marina. La mayor parte de los elementos químicos y trazas isotópicas de mayor valor a la hora de reconstruir la evolución terrestre (entre otros, agua, uranio, torio, litio, carbono, azufre, silicio, potasio, los gases nobles y el estado de oxidación del hierro) son muy lábiles. Unos pocos kilogramos de peridotita fresca procedente directamente del manto proporcionarían una información excepcional.

Llegar hasta el manto supone perforar toda la corteza oceánica, una operación de valor científico extraordinario para los geólogos. La formación de la corteza constituye la base de los ciclos tectónicos. Es el mecanismo principal por el que la Tierra transmite calor y materia desde su interior. Alrededor del 60 por ciento del material terrestre vuelve a salir a la superficie cada 200 millones de años. Hoy, los intercambios térmicos, químicos y quizá también biológicos que acontecen en las profundidades de la corteza oceánica siguen sin comprenderse en su totalidad debido a una falta de observaciones directas in situ.

En la actualidad existe ya, o sería factible desarrollarla, la tecnología necesaria para horadar un agujero de varios centímetros de diámetro a lo largo de seis kilómetros de corteza. Una técnica prometedora que podría llevar a cabo la hazaña es la que posee el barco japonés *Chikyu*, inaugurado en 2002. El buque cuenta con el sistema *riser*, consistente en un tubo exterior que rodea la sarta de perforación (el tubo de acero por el que se recuperan los testigos). El lodo de perforación y los detritos regresan al barco por el espacio anular entre los dos tubos,

FUENTE: «THE MOHOLE: A CRUSTAL JOURNEY AND MANTLE QUEST» BENOÎT ILDEFONSE. *SCIENTIFIC DRILLING JOURNAL*, VOL. 10, PÁGS. 56-62; 2010.

lo que permite reciclar el lodo, controlar sus propiedades físicas y mantener la presión dentro de la perforación para que las paredes del agujero no se desestabilicen. Esta técnica permite, además, que los detritos recuperados puedan estudiarse con fines científicos. *Chikyu* es un buque oceanográfico de enormes dimensiones, capaz de transportar diez kilómetros de tubos de perforación; asimismo, cuenta con el equipo necesario para llevar a cabo perforaciones con el sistema *riser* bajo 2,5 km de agua.

A lo largo del próximo decenio, científicos e ingenieros deberán diseñar y desarrollar nuevas brocas, lubricantes y cables de perforación para hacer posible un sondeo hasta el manto, a presiones de dos kilobares y temperaturas de hasta 300 °C, todo ello bajo una columna de agua de unos cuatro kilómetros. En concreto, se requerirá un sistema *riser* capaz de alcanzar profundidades mayores que el *Chikyu* o un sistema distinto de circulación del lodo, con parte del equipamiento instalado sobre el fondo oceánico.

A la hora de escoger el punto más adecuado para desarrollar el nuevo proyecto Mohole, debe considerarse numerosos factores. Idealmente, la profundidad del océano debería ser mínima, lo que implicaría acercarse lo más posible a la dorsal oceánica, en la que se está generando nueva corteza. Por otro lado, debería perforarse en la corteza más fría posible, pero ello supondría, en contrapartida, alejarse de la dorsal. Dadas estas limitaciones, los puntos candidatos para la perforación se reducen a tres: las costas de Hawai, Baja California y Costa Rica. Los tres presentan ventajas y desventajas. El punto en las cercanías de Hawai es el más frío pero a la vez el más profundo y, además, la actividad volcánica cercana podría haber alterado químicamente el manto y la corteza suprayacente. Se ha escogido el océano Pacífico ya que bajo sus aguas la corteza se genera a mayor velocidad que en otras regiones del planeta y, en consecuencia, la arquitectura de su basamento es más simple y uniforme. Los estudios sísmicos y geológicos han demostrado que la corteza oceánica creada en dorsales rápidas es relativamente uniforme y se asemeja más al modelo típico de los libros de texto. Por ello, confiamos en encontrar los materiales correspondientes a los modelos de corteza simple: un apilamiento de capas rocosas denominadas lavas, diques y gabros.

Mientras tanto, la comunidad científica dedicada a la perforación oceánica continúa perforando la corteza hasta la máxima profundidad permitida por la técnica estándar, sin el sistema *riser*, dispuesta en el barco *JOIDES Resolution,* el recientemente reconstruido caballo de batalla del IODP.

La corteza inferior

Cincuenta años después de que John Steinbeck navegara a bordo del *CUSS1* junto a los pioneros de la perforación de la corteza oceánica, es nuestro turno para coordinar una expedición dispuesta a obtener por primera vez un perfil transversal completo de la corteza oceánica inferior, el material situado inmediatamente por encima del manto. En la expedición 355 del IODP, que se inició el 13 de abril y terminó el 3 de junio, se han obtenido nuevos datos sobre esta zona (puede encontrarse una amplia documentación sobre la expedición en iodp.tamu.edu/scienceops/expeditions/superfast_rate_crust.html).

Se espera que los resultados de la misión arrojen luz sobre numerosas cuestiones: cómo se forma la corteza en las dorsales oceánicas; cómo intruye el magma en la corteza inferior; cuál es la geometría y el vigor con el que el agua marina absorbe el calor procedente de la corteza oceánica inferior; y, por fin, cómo contribuye la corteza inferior en las anomalías magnéticas detectadas en el dominio marino.

La perforación del manto constituye la hazaña más desafiante en la historia de las ciencias de la Tierra. Dejará un legado de conocimiento científico fundamental, además de suponer la inspiración y la formación de la siguiente generación de científicos e ingenieros. El público general y los medios de comunicación han mostrado un sorprendente interés y seguimiento del proyecto. Dado que la corteza y el manto varían en diferentes puntos, en un futuro sería interesante realizar más sondeos de este tipo. Puede parecer tan solo un sueño lejano, pero la perforación profunda se volverá con el tiempo más rutinaria y barata y la experiencia irá aumentando de forma paralela.

—Damon Teagle
Centro Oceanográfico Nacional
Universidad de Southampton
Benoît Ildefonse
Geociencias Montpellier, CNRS
Universidad de Montpellier

Artículo original publicado en:
Nature, vol. 471, págs. 437-439, 2011
Traducido con el permiso de
Macmillan Publishers Ltd. © 2011



NEUROCIENCIA

Física de la inteligencia

Puede que la evolución haya desarrollado nuestro cerebro hasta el límite permitido por las leyes de la física

Douglas Fox

ADAM VOORHES

Douglas Fox es escritor y colaborador de *New Scientist, Discover* y *Christian Science Monitor*. Ha recibido numerosos premios; el último de ellos, de la Sociedad Americana de Periodistas y Autores.





Santiago Ramón y Cajal asemejaba el funcionamiento del diminuto sistema nervioso visual de los insectos al de un finísimo reloj de bolsillo. En comparación, el de los mamíferos vendría a ser un gran reloj de pie abollado. No deja de resultar humillante que una abeja, con un cerebro de un miligramo, realice tareas como orientarse en laberintos y grandes lugares con una habilidad comparable a la de los mamíferos. El insecto quizá se vea limitado por sus relativamente pocas neuronas, pero lo que parece seguro es que las exprime hasta sacar el máximo de ellas.

En el otro extremo, el elefante, con un cerebro cinco millones de veces mayor, sufre la ineficiencia característica de un vasto imperio: las señales nerviosas tardan cien veces más tiempo en cruzar el cerebro de un extremo a otro o en llegar hasta las patas, lo que obliga al animal a fiarse poco de sus reflejos, moverse con lentitud y dedicar preciosos recursos cerebrales a planear cada uno de sus pasos.

Los humanos, en algún punto intermedio, somos más inteligentes que elefantes y abejas. Pero de lo que poca gente se percata es de que las leyes de la física imponen severas restricciones a nuestras facultades mentales. Los antropólogos han especulado sobre las barreras anatómicas que impedirían que nuestro cerebro pudiese aumentar de tamaño: por ejemplo, un recién nacido con un cerebro mayor quizá no lograse pasar por la vagina de una bípeda. Sin embargo, aunque la evolución solucionase algún día ese problema, persistirían aún obstáculos de una naturaleza mucho más profunda.

Cabría imaginar procesos evolutivos que aumentasen la cantidad de neuronas o que elevasen la velocidad a la que estas intercambian información; cambios que, en principio, incrementarían nuestra inteligencia. No obstante, varias líneas de investigación recientes sugieren que ese tipo de ajustes no tardarían en toparse con limitaciones físicas. En última instancia, dichos límites obedecen a la naturaleza de las neuronas y al ruido de las señales químicas que estas emplean para comunicarse. «Información, ruido y energía se encuentran unidos de manera inextricable», afirma Simon Laughlin, neurocientífico teórico de la Universidad de Cambridge. «Se trata de una conexión a nivel termodinámico.»

¿Imponen las leyes de la termodinámica un límite universal —aplicable a pájaros, primates y mantis religiosas— a la inteligencia con base neuronal? Si bien parece que la pregunta nunca se había planteado en términos tan amplios, los expertos entrevistados para este artículo coinciden en que se trata de una cuestión que merece la pena considerar. «Es una puntualización muy interesante», admite Vijay Balasubramanian, físico teórico de la Universidad de Pensilvania que investiga la codificación neural de la información. «Jamás he visto que nadie abordase el asunto, ni siquiera en la ciencia ficción.»

No cabe duda de que la inteligencia resulta difícil de cuantificar e incluso de definir. Con todo, parece acertado decir que, de acuerdo con la mayoría de las métricas, los humanos somos los animales más inteligentes del planeta. ¿Es posible que, en el curso de la evolución, nuestro cerebro se haya aproximado a un límite en la capacidad de procesar la información? ¿Existe un límite físico y universal para la inteligencia neuronal?

CEREBROS HAMBRIENTOS

De forma intuitiva, la manera más obvia de incrementar la potencia del cerebro consistiría en aumentar sus dimensiones. La posible conexión entre el tamaño del cerebro y la inteligencia ha fascinado a los científicos durante más de cien años. A fina-

EN SÍNTESIS

La inteligencia humana podría hallarse próxima a su límite evolutivo. Varias líneas de investigación recientes apuntan a que casi cualquier cambio en nuestro cerebro se toparía con barreras de naturaleza física.

Un cerebro de mayor tamaño aumenta la inteligencia pero solo hasta cierto punto, más allá del cual consume demasiada energía y comienza a funcionar con mayor lentitud. Un «cableado» más extenso ocuparía demasiado espacio.

Neuronas cada vez menores permitirían mayor número de conexiones en el mismo volumen. Sin embargo, existe un punto a partir del cual una neurona no puede reducir su tamaño, ya que entonces la señal se torna demasiado ruidosa.

les del siglo XIX y comienzos del XX, los biólogos dedicaron grandes esfuerzos a explorar las propiedades generales de la vida y a hallar leyes matemáticas relativas a la masa corporal y, en concreto, a la masa del cerebro; leyes que fuesen aplicables a todo el reino animal. En principio, un cerebro de mayor tamaño albergaría más neuronas, lo que le permitiría aumentar su complejidad. Sin embargo, desde el principio quedó claro que las dimensiones del cerebro no determinaban por sí solas el grado de inteligencia: una vaca posee un cerebro cien veces mayor que el de un ratón, pero no es más lista. Al pasar de una especie a otra, el cerebro aumenta con la masa corporal, pero solo para poder realizar un número mayor de funciones triviales. Un animal de gran tamaño exige de su cerebro una proporción mayor de faenas rutinarias no relacionadas con la inteligencia, como controlar más nervios táctiles, procesar las señales procedentes de retinas más amplias y controlar un mayor número de fibras musculares.

Eugene Dubois, el anatomista holandés que en 1892 descubrió en Java el cráneo de *Homo erectus*, deseaba disponer de un método para calcular la inteligencia de los animales a partir del tamaño de sus cráneos fósiles, por lo que intentó definir una relación matemática entre las dimensiones del cerebro y las del cuerpo de un animal. Suponía que aquellos con cerebros desproporcionadamente voluminosos serían también más inteligentes. Dubois y otros autores recopilaron cada vez más datos sobre la relación entre la masa cerebral y la corporal. Un tratado clásico refería el peso del cuerpo, los órganos y las glándulas de 3690 animales, desde las cucarachas hasta las garzas, pasando por los perezosos didáctilos y los tridáctilos.

Los sucesores de Dubois hallaron que la masa del cerebro de las especies de mamíferos crecía más despacio que su masa corporal: en concreto, según una ley de potencias con exponente aproximadamente igual a 3/4. Así, la rata almizclera, aunque 16 veces más pesada que un ratón, posee un cerebro 8 veces más grande. De este resultado podía derivarse la herramienta que buscaba Dubois: el cociente de encefalización, que compara la masa del cerebro de una especie con lo que se esperaría a partir de su masa corporal según dicha ley de potencias. En los humanos, dicho cociente toma el valor de 7,5; es decir, nuestro cerebro es 7,5 veces mayor de lo que predice la ley de potencias. Algunos delfines llegan hasta el valor 5,3, los monos rondan el 4,8 y los bueyes se quedan en el 0,5. Por tanto, puede que la inteligencia dependa de la reserva neuronal que queda libre después de que el cerebro se encargue de las tareas básicas, como dar cuenta de las sensaciones táctiles.

Parece muy probable que, al aumentar de tamaño, el cerebro de mamíferos y aves se beneficiase de una suerte de economía de escala. La cantidad de información que puede transportar una señal aumenta de manera implícita con el número de caminos neurales que esta puede tomar. Ello implica que, en un cerebro mayor, las neuronas no necesitan excitarse tantas veces por segundo. Sin embargo, quizás exista una tendencia competitiva: Balasubramanian considera muy probable que, a partir de cierto punto, alguna ley de rendimientos decrecientes impida que la inteligencia siga aumentando al ir añadiendo más neuronas. El tamaño trae consigo sus propias cargas; la más obvia, un mayor gasto energético. En los humanos, el cerebro es el órgano más hambriento de todos: con un 2 por ciento de la masa corporal, devora el 20 por ciento de las calorías que consumimos en reposo. En los recién nacidos llega a un asombroso 65 por ciento.

MANTENER EL CONTACTO

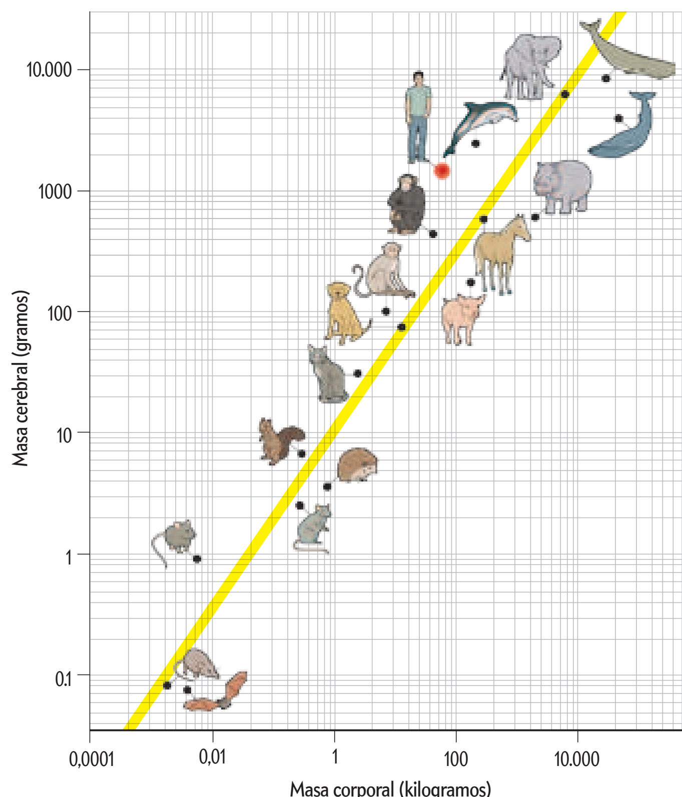
Gran parte de la energía que necesita el cerebro se invierte en sus redes de comunicación: en la corteza del cerebro humano, estas consumen hasta el 80 por ciento de la energía. Por otra parte, parece que un aumento de tamaño acarrea también dificultades estructurales para la conectividad neuronal. Durante la primera mitad del siglo XX, a medida que los expertos fueron acumulando más y más datos sobre la masa encefálica, hubieron de enfrentarse a una tarea mucho más desalentadora: definir cuáles eran los «principios de diseño» del cerebro y

---

MASA CEREBRAL Y MASA CORPORAL

Cerebros atípicos

Más inteligentes o no, lo normal es que los animales de mayor tamaño posean una mayor masa cerebral. Esta, no obstante, no aumenta de manera proporcional al peso del cuerpo, sino según una ley de potencias con exponente 3/4. En una escala logarítmica doble (*abajo*), esa dependencia se convierte en lineal. Los animales más inteligentes son aquellos cuyo cerebro excede lo predicho por la ley de potencias. El cerebro humano supera en un factor 7,5 lo que correspondería a su masa corporal, más que cualquier otra especie. No obstante, más allá de cierto punto, un cerebro mayor comienza a resultar ineficiente.



BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*), FUENTE: «BRAIN SIZE IN VERTEBRATES», POR P.A.M. VAN DONGEN, EN *THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM OF VERTEBRATES*, VOL. 3, DIRIGIDO POR R. NIEUWENHUYS ET AL., SPRINGER, 1998

averiguar el modo en que estos se conservaban en cerebros de distintos tamaños.

Una neurona típica posee un largo apéndice llamado axón. En su extremo, el axón se ramifica; las puntas de esas ramificaciones forman las sinapsis, el lugar de contacto con otras células. Los axones pueden conectar partes diferentes del cerebro o formar nervios que se extienden desde el sistema nervioso central hasta otras partes del organismo.

Al principio, los biólogos midieron el diámetro de los axones y calcularon el tamaño y la densidad de las células nerviosas, así como el número de sinapsis por célula. Estudiaron las neuronas de un gran número de especies. A fin de refinar sus gráficas para incluir animales cada vez mayores, concibieron métodos para extraer intacto incluso el cerebro de un cadáver de ballena. El procedimiento, descrito con meticulosidad en la década de 1880 por el biólogo Gustav Adolf Guldberg, duraba cinco horas y requería emplear un tronzador, un hacha y un escoplo —además de un esfuerzo enorme— para abrir la tapa del cráneo del animal.

Las neuronas de la materia gris de la corteza humana poseen axones que rozan el límite físico de tamaño

Dichos estudios parecían indicar que los pequeños cambios que iban apareciendo conforme el cerebro aumentaba de tamaño probablemente acabarían por tornarse insostenibles. A medida que el cerebro crece, primero aumenta el tamaño promedio de las neuronas, ya que eso les permite conectarse con un número mayor de vecinas. Pero en la corteza, cuanto mayores son las células, menor es la densidad de neuronas, con lo que la distancia entre ellas aumenta y, por tanto, crece también la longitud de los axones que las conectan. Un axón más largo implica que las señales tardan más tiempo en propagarse, por lo que estas prolongaciones nerviosas también se van tornando más gruesas, ya que la velocidad del impulso aumenta con el espesor del axón.

Los cerebros de grandes proporciones también cuentan con más áreas diferenciadas. A cada una de ellas suele corresponderle una función particular, como la comprensión del lenguaje o el reconocimiento de rostros. En los cerebros más voluminosos, esta especialización se despliega en otra dimensión más: áreas equivalentes de los hemisferios izquierdo y derecho se encargan de funciones distintas: por ejemplo, del razonamiento espacial y del verbal.

Esa lateralización del cerebro fue considerada durante décadas una señal distintiva de la inteligencia. Pero, como apunta Mark Changizi, neurobiólogo teórico de los Laboratorios 2AI de Bois, en Idaho, puede que la especialización obedezca a un fin más banal: compensar el problema de conectividad que aparece en los cerebros grandes. El cerebro de una vaca, con un número de neuronas cien veces mayor que el de un ratón, no puede mantener a todas igual de bien conectadas. La solución consiste en agrupar a las que desempeñan funciones parecidas en módulos muy interconectados. La especialización entre los hemisferios derecho e izquierdo resuelve un problema similar, pues reduce la cantidad de información que debe fluir de un lado a otro, lo que minimiza el número de axones interhemisféricos, de gran longitud. «Todas estas cuestiones, en apariencia complejas y características de los cerebros de gran tamaño, no son sino ejercicios de contorsionismo para resolver el problema de la conectividad», explica Changizi. «Ello no implica en absoluto un cerebro más inteligente.»

Jan Karbowski, neurocientífico computacional de la Academia Polaca de las Ciencias, se muestra de acuerdo: «De algún modo, el cerebro ha de optimizar varios parámetros a la vez, por lo que tiene que adoptar soluciones de compromiso. Algunos aspectos mejoran, en detrimento de otros». ¿Qué sucedería si, al aumentar el tamaño del cerebro, el cuerpo calloso (el manojo de axones que conecta ambos hemisferios) se alargase de tal manera que la conectividad entre los hemisferios permaneciese constante? ¿Y si los axones se ensancharan, a fin de que las señales no se retrasasen? El resultado no sería tan óptimo: el cuerpo calloso tendría que aumentar su volumen de tal manera que apartaría demasiado los hemisferios y no se apreciarían mejoras considerables.

Esa clase de compromisos ha quedado patente en los experimentos sobre la relación entre el grosor del axón y la velocidad de transmisión de la señal. Karbowski explica que, al aumentar el tamaño del cerebro, también las neuronas crecen, pero no lo bastante como para permanecer igual de bien conectadas. Y aunque los axones se tornan más gruesos, no se ensanchan lo suficiente como para contrarrestar los retrasos en la transmisión.

Evitar que los axones aumenten demasiado su grosor no solo ahorra espacio, sino también energía, apunta Balasubramanian. Al doblar el espesor de un axón, el gasto energético se duplica, pero la velocidad de los impulsos aumenta solo en un 40 por ciento. Al final, al incrementar el tamaño del cerebro, el volumen de la materia blanca (los axones) crece más deprisa que el de la materia gris (el soma de las neuronas, que contiene el núcleo de la célula). Dicho de otro modo, cuanto más grande es un cerebro, mayor es la fracción de su volumen dedicada al cableado y menor la encargada de calcular. Ello sugiere que, a la larga, un cerebro demasiado grande sería inviable.

LA VENTAJA DE LOS PRIMATES

Así las cosas, resulta fácil entender por qué el cerebro de una vaca, grande como un pomelo, no es mucho más hábil que el de un ratón, del tamaño de un arándano. Sin embargo, la evolución ha hallado algunas soluciones impresionantes. En 2007, John H. Kaas, neurocientífico de la Universidad Vanderbilt, y sus colaboradores realizaron un estudio comparativo de la morfología neuronal de los primates y se toparon con un cambio en las reglas del juego. Uno que probablemente haya resultado muy ventajoso para los humanos.

Kaas halló que, a diferencia de lo que ocurre en la mayoría de los mamíferos, las neuronas corticales de los primates aumentan muy poco de tamaño con relación al volumen del cerebro. Las pocas que sí lo hacen son las que han de cargar con la tarea de mantener las conexiones. Pero la gran mayoría no crece. Así, a medida que en las diferentes especies de primates el cerebro va adquiriendo dimensiones mayores, la densidad de neuronas se mantiene casi constante. El cerebro del mico nocturno pesa el doble que el del tití y contiene el doble de neuronas. En los roedores, sin embargo, el doble de masa cerebral solo añade un 60 por ciento más de neuronas. Las consecuencias de lo anterior son enormes. El cerebro humano, con 1,4 kilogramos de peso, cuenta con 100 mil millones de neuronas. Un ratón, con la proporción habitual en esos animales, necesitaría uno de 45 kilogramos para alcanzar ese número. Desde

un punto de vista metabólico, esa masa encefálica devoraría al animal.

Disponer de neuronas de menor tamaño y muy apretadas sí parece influir en la inteligencia. En 2005, los neurobiólogos Gerhard Roth y Ursula Dicke, de la Universidad de Bremen, hallaron varios factores que predecían la inteligencia (definida en términos de complejidad conductual) con mayor exactitud que el cociente de encefalización. Según Roth: «Lo único que guarda correlación con la inteligencia es el número de neuronas de la corteza y la rapidez de la actividad neuronal». Esta última disminuye con la distancia entre neuronas y aumenta con el grado de mielinización de los axones. La mielina es un aislamiento graso que permite a los axones transmitir señales a mayor velocidad.

Las diminutas neuronas de los primates cumplirían por tanto una doble función: por un lado, permiten un aumento mucho mayor del número de neuronas corticales a medida que el cerebro gana volumen; por otro, la comunicación entre ellas es más rápida, puesto que se encuentran más próximas unas de otras. Los elefantes y las ballenas son relativamente inteligentes, pero el gran tamaño de sus neuronas y sus voluminosos cerebros los hacen menos eficientes. «La densidad neuronal disminuye mucho —dice Roth—, lo que significa que la distancia entre las células es mayor y la velocidad de los impulsos nerviosos, mucho más baja.»

De hecho, hace poco se han observado pautas similares incluso entre seres humanos: los sujetos con líneas de comunicación más rápidas entre las áreas cerebrales parecen ser los más brillantes. Un estudio dirigido en 2009 por Martijn P. van den Heuvel, del Hospital de la Universidad de Utrecht, empleó imágenes de resonancia magnética funcional para determinar cuán directamente se comunicaban entre sí las áreas cerebrales de varios pacientes (es decir, si las señales pasaban por más o menos regiones intermedias). Van den Heuvel halló que aquellos individuos con sendas más cortas entre las regiones cerebrales presentaban un coeficiente intelectual mayor. El mismo año, Edward Bullmore, de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores obtuvieron resultados similares. Compararon la memoria de trabajo (la capacidad de retener varios números a la vez) de 29 sujetos sanos. Luego, mediante registros magnetoencefalográficos, calcularon la rapidez con la que fluía la comunicación entre sus áreas cerebrales. Las personas con una comunicación más directa y veloz gozaban de una mejor memoria de trabajo.

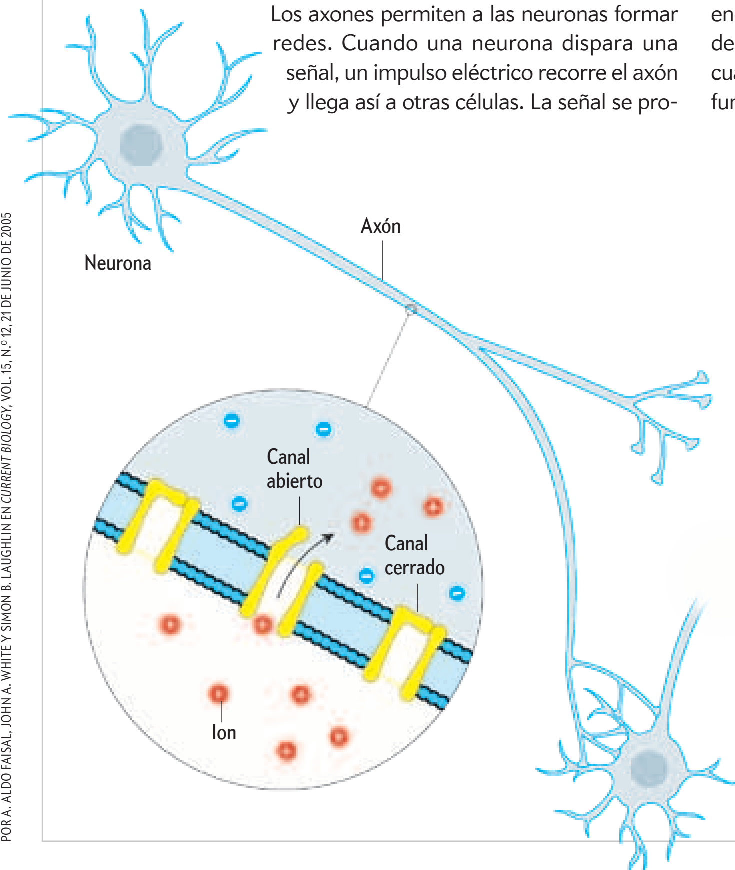
LÍMITES DE LA MINIATURIZACIÓN

Física del pensamiento

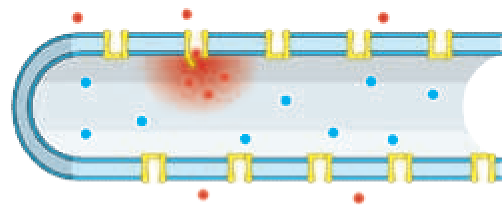
Al igual que ocurre con los transistores en un ordenador, un cerebro con neuronas de menor tamaño podría agrupar más de ellas en menos espacio para aumentar su potencia y su velocidad. Sin embargo, puede que las neuronas humanas y sus axones hayan alcanzado el límite físico de miniaturización.

Los axones permiten a las neuronas formar redes. Cuando una neurona dispara una señal, un impulso eléctrico recorre el axón y llega así a otras células. La señal se propaga mediante la apertura de los canales iónicos de la membrana celular (*inserto*), lo que permite el flujo de iones. Cuando un número suficiente de ellos cruza el canal, se genera un voltaje que abre a su vez los canales vecinos en un efecto dominó.

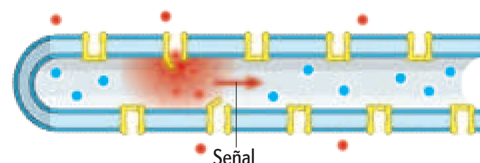
Si los axones fueran más pequeños se ahorrarían espacio y energía, pero entonces la apertura al azar de un canal induciría demasiado ruido en la señalización y los impulsos se dispararían cuando no deben. La naturaleza parece haber llegado al límite funcional de la miniaturización.



FLUCTUACIONES INOCUAS Cuando en un axón típico se abre un canal iónico de manera espontánea, vuelve a cerrarse antes desencadenar una cascada.



SEÑAL INDEBIDA En un axón más delgado, la apertura aleatoria de uno de los canales dispararía la de los canales vecinos e iniciaría una reacción en cadena cuando no debería.

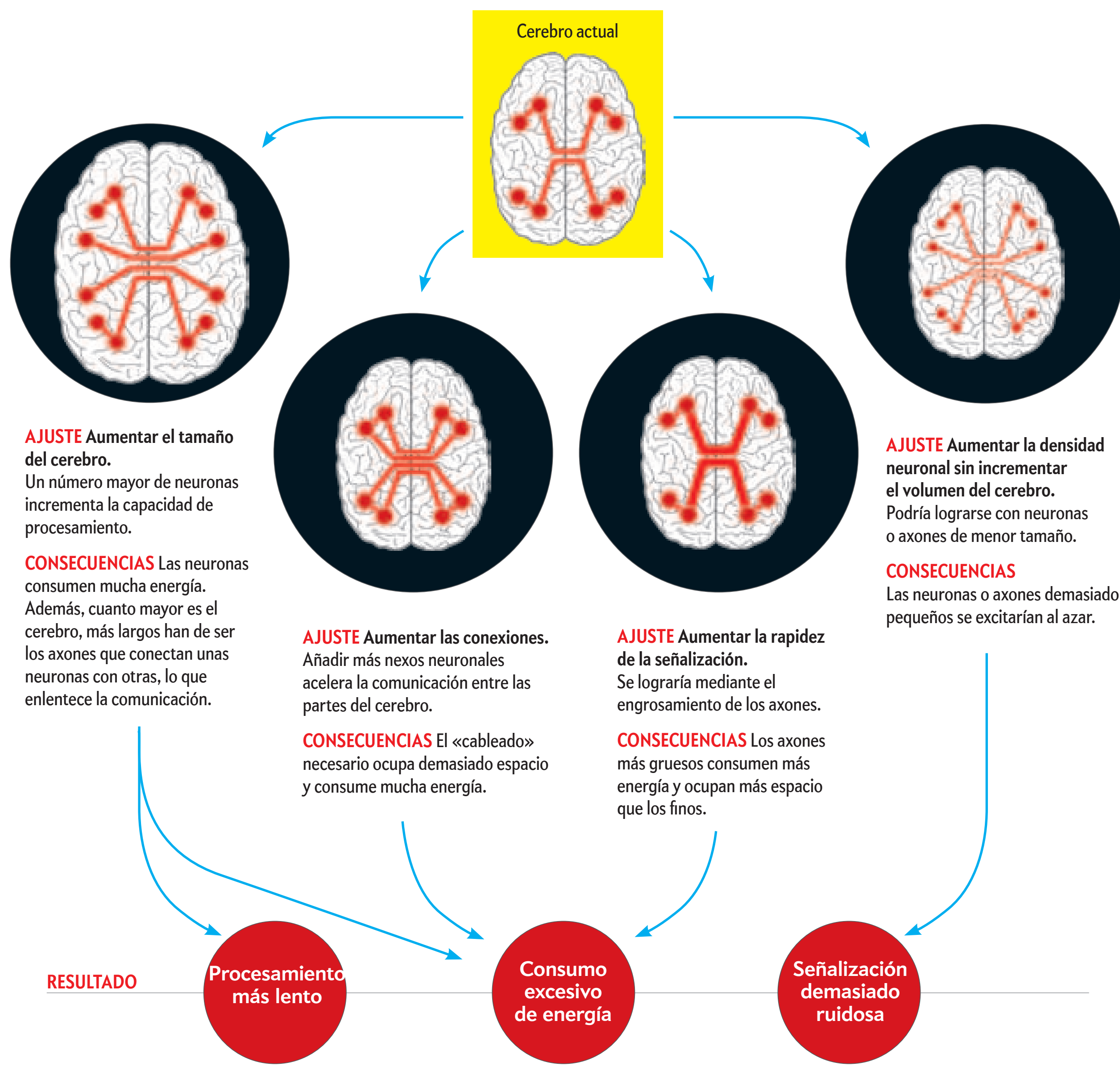


BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*), FUENTE: «ION-CHANNEL NOISE PLACES LIMITS ON THE MINIATURIZATION OF THE BRAIN'S WIRING,» POR A. ALDO FAISAL, JOHN A. WHITE Y SIMON B. LAUGHLIN EN *CURRENT BIOLOGY*, VOL. 15, N.º 12, 21 DE JUNIO DE 2005

SOLUCIONES DE COMPROMISO

Obstáculos para una inteligencia mayor

Cada uno de los ajustes evolutivos que, en principio, podrían aumentar nuestra inteligencia se topa con impedimentos de naturaleza física. Quizá nos hallemos próximos a los límites de la inteligencia con base neuronal.



BROWN BIRD DESIGN

El descubrimiento reviste una importancia trascendental. Hemos visto que, al aumentar de tamaño, el cerebro limita el número de conexiones directas entre las diferentes áreas a fin de ahorrar espacio y energía. El nuestro posee relativamente pocas conexiones de larga distancia, pero Bullmore y Van den Heuvel han demostrado que estas ejercen un efecto desproporcionado sobre la inteligencia: cuando un cerebro escatima recursos y reduce algunas de estas conexiones, su funcionamiento se resiente. «La inteligencia tiene un precio», concluye Bullmore. «El precio es que no puede minimizarse sin más el cableado.»

EL DISEÑO DE LA INTELIGENCIA

Si la comunicación entre las neuronas y entre las zonas del cerebro fuese el obstáculo principal a la hora de aumentar la inteligencia, una posible solución evolutiva consistiría en desarrollar neuronas de menor tamaño y empaquetamientos más densos. Ello aumentaría la rapidez de la comunicación y produciría cerebros más inteligentes. La eficiencia también aumentaría si los axones transmitiesen las señales a mayor velocidad a través de distancias más largas sin tener por ello que aumentar su grosor. Sin embargo, algo impide reducir el tamaño de las neuronas y el de los axones más allá de cierto punto. A esta

barrera podríamos llamarla «la madre de todas las limitaciones»: los canales iónicos, las proteínas que las neuronas usan para generar impulsos eléctricos, son poco fiables.

Un canal iónico consiste en una válvula diminuta que se abre y se cierra debido a los cambios en su plegamiento. Al abrirse, los iones de sodio, potasio o calcio fluyen a través de la membrana celular y generan los impulsos eléctricos que las neuronas emplean para comunicarse. Pero, debido a su minúsculo tamaño, las meras fluctuaciones térmicas abren y cierran canales. Este fenómeno se observa con facilidad en el laboratorio. Supongamos que nos servimos de un pequeño tubo de vidrio microscópico para aislar uno solo de los canales iónicos que se reparten sobre la superficie de una neurona. Si ajustamos el voltaje del canal —el mecanismo que debería provocar su apertura o cierre—, veremos que este jamás responde de manera fiable. En lugar de comportarse como el interruptor de una lámpara, que la enciende o la apaga cada vez que lo accionamos, un canal iónico aislado reacciona al azar. En ocasiones no se abre en absoluto; en otras, lo hace cuando no debería. Alterar el voltaje solo cambia la probabilidad de que el canal se abra, pero no determina con seguridad si lo hará o no.

Lo anterior quizá parezca un fiasco evolutivo, pero en realidad no supone sino otra solución de compromiso. Podemos imaginar el canal iónico como un pequeño muelle que hay que accionar: «Si el muelle es uno que no cuesta casi nada deformar, las pequeñas fluctuaciones bastarán para activarlo —explica Laughlin—. Si fuese muy rígido su comportamiento no sería tan aleatorio, pero accionarlo costaría mucha más energía». Por tanto, parece que las neuronas ahorran energía gracias a que el gatillo que dispara la apertura y cierre de los canales iónicos es extremadamente sensible. El precio que pagan por ello es que cada canal se abre y se cierra de manera poco predecible. Sin embargo, el conjunto formado por un gran número de canales iónicos sí opera con fiabilidad, ya que en ese caso los canales pueden «votar» si la neurona emitirá o no un impulso. El problema con las neuronas demasiado pequeñas reside en que esa votación se torna problemática: si se reduce el tamaño de las neuronas, disminuye el número de canales disponibles para transmitir la señal. Y eso incrementa el ruido.

En dos artículos publicados en 2005 y 2007, Laughlin y sus colaboradores calcularon si el requisito de incluir suficientes canales iónicos limitaba el tamaño de los axones. Hallaron que, cuando los axones se encogían hasta los 200 o 150 nanómetros de diámetro, el ruido de la señal aumentaba tanto que la inutilizaba. Llegados a ese punto, un axón contiene tan pocos canales iónicos que la apertura accidental de uno solo de ellos puede desencadenar una señal que la neurona no debía emitir. Los axones más pequeños del cerebro probablemente disparan de manera fortuita unas seis veces por segundo. Si su tamaño fuese tan solo un poco menor, llegarían a hacerlo cien veces por segundo. «Las neuronas de la materia gris de la corteza dependen de axones que ya rozan el límite físico», concluye Laughlin.

Ese compromiso entre información, energía y ruido no es exclusivo de la biología. Se aplica a las comunicaciones por fibra óptica, a las transmisiones por radio y a los circuitos integrados de los ordenadores. Un transistor actúa a modo de guardabarrera de las señales eléctricas, la misma función que desempeñan los canales iónicos. Durante cinco décadas, los ingenieros han ido miniaturizando cada vez más los transistores y los han empaquetado en dispositivos de menor tamaño. Los más modernos miden unos 22 nanómetros, un tamaño que al dopar el silicio (añadirle pequeñas cantidades de otros elementos para ajustar sus propiedades) ya comienza a revestir dificultades. Si midiesen 10 nanómetros, un solo átomo de boro bastaría para desestabilizar el funcionamiento de un transistor.

Quizá los ingenieros solucionen algún día el problema de la miniaturización de los circuitos integrados gracias a técnicas y diseños completamente nuevos. Pero la evolución no puede partir de cero: se ve obligada a mejorar el esquema con el que lleva trabajando desde hace 500 millones de años.

Existe otra razón para dudar de que un salto evolutivo nos haga algún día mucho más inteligentes. Puede que, antes de que apareciesen las neuronas, la biología barajase varias posibilidades para afrontar la cuestión de crear seres inteligentes. Sin embargo, desde entonces ha ocurrido algo extraño. A primera vista, el cerebro de la abeja, el del pulpo y el de los mamíferos inteligentes no parecen asemejarse en nada. Pero si nos fijamos en los circuitos cerebrales encargados de tareas como la visión, el olfato o la memoria episódica, comprobaremos que todos ellos se arreglan conforme a las mismas disposiciones básicas. Una convergencia evolutiva semejante suele indicar que la solución anatómica o fisiológica en cuestión ha llegado a su madurez, por lo que tal vez no quede mucho lugar para posibles mejoras.

LAS ABEJAS LO HACEN

¿Ha alcanzado nuestro cerebro la máxima complejidad que permiten las leyes físicas? Laughlin duda que la inteligencia se vea limitada por una cota rígida e inmutable, del estilo de la que afecta a la velocidad de la luz. «Es más probable que lo que exista sea una ley de rendimientos decrecientes: llega un momento en el que ya no compensa invertir más recursos», sostiene. La densidad de neuronas, el número de conexiones de cada una y la cantidad de impulsos que estas pueden transmitir por segundo son los que son. Por otra parte, un aumento cerebral y corporal exigiría un consumo energético mayor, habría más perdidas por disipación del calor corporal y los impulsos nerviosos tardarían más tiempo en propagarse.

No obstante, tal vez la mente humana disponga de mejores métodos para expandirse sin necesidad de recurrir a la evolución. Las abejas y otros insectos sociales lo hacen: al actuar junto con sus compañeras de colmena, forman una entidad colectiva mucho más inteligente que la suma de sus partes. En nuestro caso, las interacciones sociales nos permiten poner en común nuestra inteligencia con la de otros.

¿Y la tecnología? Durante milenios, la escritura nos ha permitido almacenar mucha más información que la que jamás lograríamos retener en la memoria. Hoy, podríamos argumentar que la tendencia a extender nuestras capacidades intelectuales más allá de los límites de nuestro cuerpo ha hallado en Internet su máxima expresión. En el fondo, puede que sea cierto que Internet nos hace más estúpidos: quizá la inteligencia colectiva —cultura y ordenadores— haya reducido la necesidad de aumentar nuestra inteligencia individual.

PARA SABER MÁS

Evolution of the brain and intelligence. Gerhard Roth y Ursula Dicke en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 9, n.º 5, págs. 250-257, mayo de 2005.

Cellular scaling rules for primate brains. Suzana Herculano-Houzel, Christine E. Collins, Peiyan Wong y Jon H. Kaas en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 104, n.º 9, págs. 3562-3567, 27 de febrero de 2007.

Effocoemcy of functional brain networks and intellectual performance. Martijn P. van den Heuvel, Cornelis J. Stam, René S. Kahn y Hilleke E. Hulshoff Pol en *Journal of Neuroscience*, vol. 29, n.º 23, págs. 7619-7624, 10 de junio de 2009.

El cúmulo de las Pléyades, uno de los más conocidos y mejor estudiados, es tan joven que muchas de sus estrellas masivas, de color azul y vida efímera, aún brillan. En este cúmulo se basó la primera «tabla periódica» de la astronomía, el diagrama de Hertzsprung-Russell.

ASTROFÍSICA

LA TABLA PERIÓDICA DE LAS ESTRELLAS

El diagrama de Hertzsprung-Russell acaba de cumplir cien años. A pesar de su sencillez, sigue siendo una de las mejores herramientas conceptuales para entender la física estelar

Ken Croswell

La astronomía moderna nos presenta un universo poblado por una gran variedad de estrellas exóticas, desde supergigantes rojas del tamaño de un sistema planetario hasta enanas blancas hiperdensas y menores que nuestro planeta. El descubrimiento de todos esos astros se antoja aún más extraordinario si tenemos en cuenta que, para inferir su existencia, los astrónomos lo hacen a partir de destellos de luz muy tenues, a menudo compuestos por no más que unos pocos fotones. Una de las claves para deducir tanto a partir de tan poco es un sencillo gráfico introducido hace cien años.

En el diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R) se representan dos de las propiedades básicas de las estrellas: la luminosidad (o brillo intrínseco) frente a la temperatura superficial (la que se corresponde con su color). En cierto sentido, el diagrama de H-R es a la física estelar lo que la tabla periódica de los elementos es a la química. Si la tabla periódica agrupa los elementos según sus propiedades (al situar, por ejemplo, todos los gases nobles en una misma columna), la posición de las estrellas en el diagrama de H-R indica su estado evolutivo. Sin embargo, cuando nació el diagrama se desconocían por completo los procesos de formación, crecimiento y muerte de una estrella. Nadie podía asegurar si algún día el Sol ex-

ROGELIO BERNAL ANDREO *deepskycolors.com*

CÓMO USAR EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL

TIPO Y COLOR ESTELAR

De manera parecida a lo que ocurre cuando calentamos un metal, el color de una estrella refleja la temperatura de su superficie: desde un rojo tibio (*derecha*) hasta un azul candente (*izquierda*). Ello permite dividir a las estrellas en siete tipos espectrales: O, B, A, F, G, K y M. Estos se basan en los elementos químicos que absorben luz en las capas externas, lo que a su vez depende de la temperatura. En castellano, una regla mnemotécnica para recordarlos es: «Otros Buenos Astrónomos Fueron Galileo, Kepler y Messier».

SECUENCIA PRINCIPAL

La mayoría de las estrellas se extienden a lo largo de la diagonal que cruza el diagrama de la parte superior izquierda a la esquina inferior derecha. Ello se debe a que tanto la luminosidad como la temperatura de la mayor parte de las estrellas vienen determinadas por un tercer parámetro: la masa. Las estrellas más calientes y brillantes (*izquierda*) poseen una masa mayor. Una vez que una estrella comienza a producir energía gracias a las reacciones nucleares de fusión del hidrógeno, se alcanza un estado de equilibrio y el astro se mantiene en la misma posición del diagrama durante la mayor parte de su vida.

GIGANTES/SUPERGIGANTES

Estas estrellas abandonaron la secuencia principal cuando agotaron el hidrógeno del núcleo y comenzaron a quemar otras reservas de combustible, como el helio. Las más masivas se convierten en supergigantes; las menores, en gigantes. Si una supergigante ocupase el lugar del Sol, su tamaño abarcaría hasta la órbita de Júpiter. Estas estrellas no se mantienen fijas en el diagrama, sino que se desplazan a medida que evolucionan.

HIPERGIGANTES

Las estrellas más masivas de todas se hallan en la parte superior izquierda. El récord actual lo posee R136a1, que nació con una masa 320 veces superior a la del Sol, si bien desde entonces ha perdido parte de su material en forma de vientos estelares (ráfagas de partículas emitidas por el astro). Otra estrella muy masiva e inestable es Eta Carinae, la cual se halla envuelta en una nebulosa de gas como resultado de una violenta eyección de material que ocurrió hace 170 años.

ENANAS BLANCAS

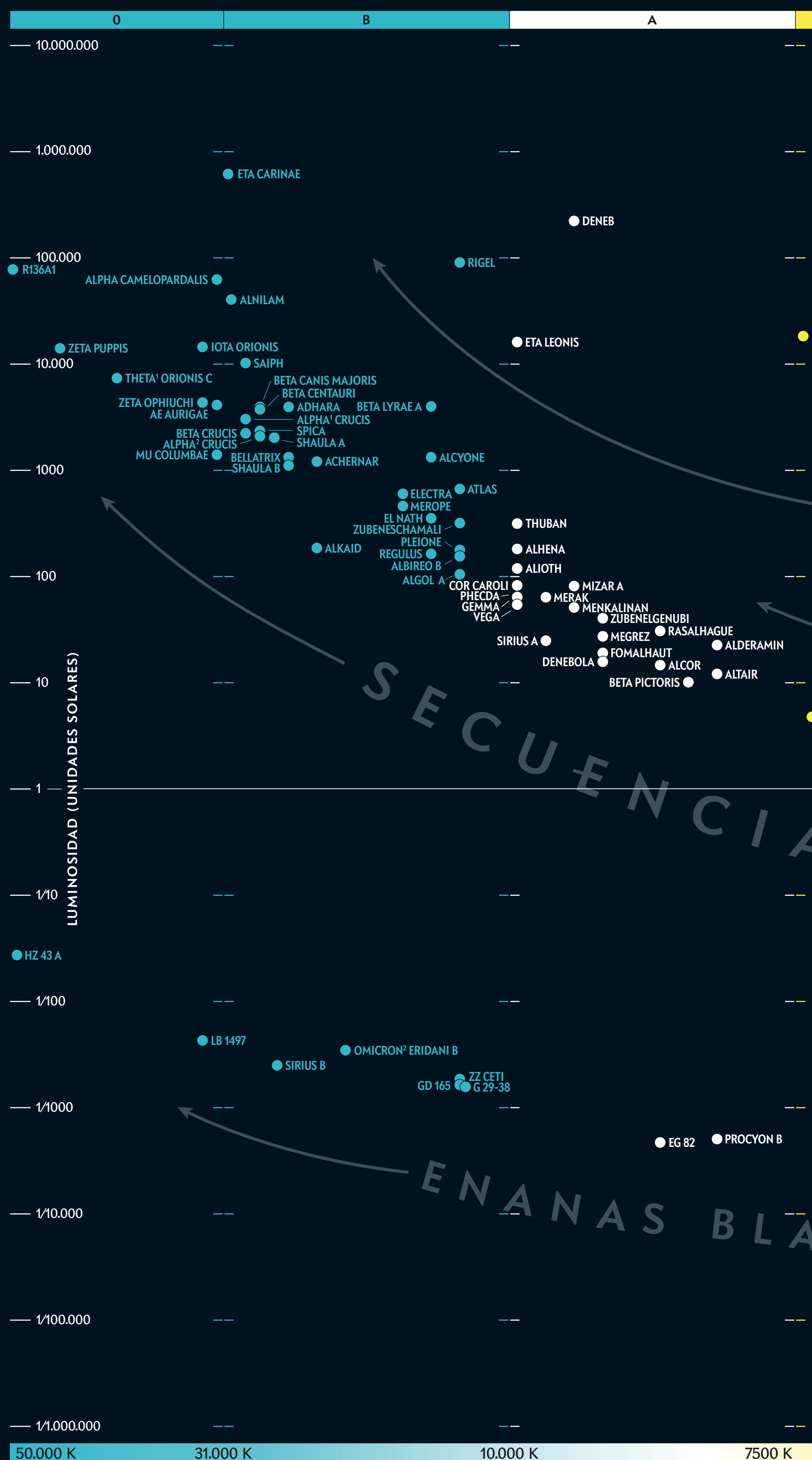
Son el remanente que deja la inmensa mayoría de las estrellas una vez que han agotado todo el combustible nuclear. Ya no pueden generar energía, por lo que se comprimen por su propio peso hasta alcanzar un tamaño similar al de la Tierra. A pesar de su nombre, brillan en un amplio abanico de colores. Con el tiempo, se van desplazando hacia la derecha del gráfico hasta que dejan de ser visibles.

EL SOL

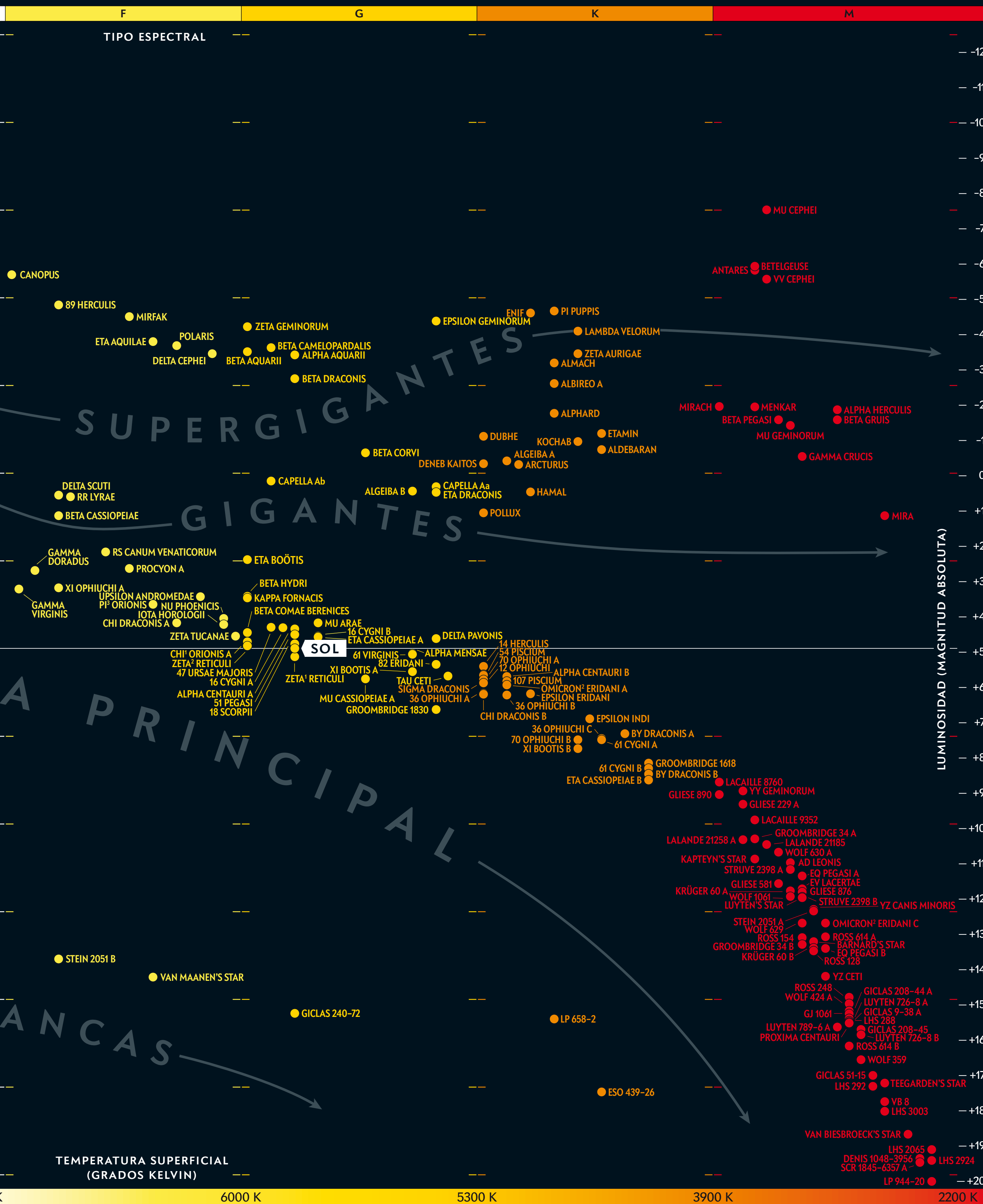
El Sol es una estrella de la secuencia principal. Nació en forma de una protoestrella fría; una vez que agote su hidrógeno se convertirá en una gigante roja y, después, en una enana blanca. El Sol no es tan común como suele afirmarse: alrededor del 95 por ciento de las estrellas ocupan posiciones inferiores en el diagrama.

ENANAS MARRONES

Uno de los retos de la astrofísica actual consiste en detectar y estudiar enanas marrones, estrellas tan ligeras que no logran mantener los procesos de fusión nuclear. En el diagrama se solapan con las estrellas más débiles y rojas de la esquina inferior derecha (LP 944-20 es una de ellas) y se extenderían más allá del diagrama en esa dirección. A fin de clasificarlas, hace una década se añadieron los tipos espectrales L y T (*no mostrados en la figura*).



Descargue gratis el póster del diagrama de H-R en **www.investigacionyciencia.es**



PITCH INTERACTIVE (*gráfico*), KEN CROSWELL (*datos estelares*)

plotaría o no, y se ignoraba que la gran mayoría de los elementos químicos que componen la Tierra y nuestros cuerpos habían sido sintetizados en las estrellas.

El diagrama de H-R no solo ayudó a resolver tales cuestiones, sino que aún hoy sirve de guía para abordar numerosas preguntas. ¿Qué masa puede llegar a alcanzar una estrella? ¿Cómo fueron las primeras estrellas que se formaron tras la gran explosión? ¿Cuándo veremos la próxima supernova en la Vía Láctea?

UN BESTIARIO ESTELAR

«Nadie imaginó que yo acabaría siendo un astrónomo», refirió en cierta ocasión el danés Ejnar Hertzsprung. Cuando contaba veinte años, su familia vendió los libros de astronomía de su difunto padre. Pero Hertzsprung perseveró y, en 1908, bosquejó el primer diagrama de luminosidad frente a color para cúmulos estelares. Hans Rosenberg, astrónomo alemán que probablemente conociese el trabajo de Hertzsprung, publicó un diagrama similar en 1910. En 1911, Hertzsprung —por aquel entonces, un perfecto desconocido— publicaba varios más.

Ignorante de la obra del danés, Henry Norris Russell, uno de los astrónomos más reconocidos de EE.UU., elaboró su propio gráfico en 1913. Debido a su prestigio, en un primer momento sus compañeros de profesión dieron al gráfico el nombre de «diagrama de Russell». Solo después pasaría a conocerse como diagrama de Russell-Hertzsprung y, por último —en justo reconocimiento histórico—, como diagrama de Hertzsprung-Russell.

A medida que fueron incluyéndose más estrellas en el diagrama, se hicieron evidentes algunos patrones. La mayoría de las estrellas, entre las que se contaba el Sol, se situaban a lo largo de la diagonal que cruzaba desde la esquina superior izquierda (las estrellas más calientes y brillantes) hasta el extremo inferior derecho (las más débiles y frías). Esta línea oblicua recibe el nombre de *secuencia principal*. Su existencia supuso toda una revelación, pues relacionaba objetos en apariencia opuestos. Todas las estrellas de la secuencia principal generan energía de la misma manera: a partir de las reacciones nucleares que tienen lugar en su interior y en las que el hidrógeno se fusiona para producir helio. Cuanta más masa posee una estrella, mayor es la temperatura que se alcanza en el centro y con mayor rapidez se suceden las reacciones nucleares, lo que aumenta la temperatura y el brillo del astro. Por tanto, la secuencia principal representa, en realidad, una secuencia de masas.

Existe otro grupo de astros que se sitúa por encima y a la derecha de la secuencia principal; es decir, estrellas que brillan con mayor intensidad que aquellas de la secuencia principal que presentan el mismo color. La mayoría se encuentran más frías que el Sol, pero todas son más brillantes. A primera vista parecería una contradicción, puesto que cuanto menor es la temperatura de una estrella, menos irradia por unidad de superficie. ¿Cómo puede entonces una estrella roja y fría brillar cien, mil, o incluso diez mil veces más que el Sol? La razón se halla en su tamaño descomunal. Tales objetos reciben el nombre de gigantes y supergigantes; representan el destino de las estrellas de la secuencia principal una vez que estas agotan el hidrógeno y comienzan a quemar otras reservas de combustible, como el helio. Al final de sus días, las supergigantes acaban explotando como supernovas; las gigantes abandonan la escena de manera algo más discreta.

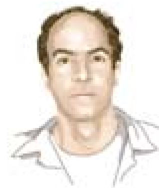
El destino de estas últimas aparece también en el diagrama de H-R. Existe un conjunto de estrellas que se agrupan en una diagonal por debajo de la secuencia principal; son, por tanto, menos luminosas para un mismo color o temperatura. Mediante un razonamiento análogo al anterior, podemos deducir que tales estrellas han de ser muy pequeñas. De hecho, los astrónomos han dado en llamarlas enanas blancas, aunque en realidad exhiben un amplio abanico de colores. Estos objetos constituyen el remanente estelar, muy denso y caliente, que sobrevive una vez que las gigantes se han desprendido de sus capas exteriores. En el interior de las enanas blancas ya no se producen reacciones nucleares, por lo que su luminosidad y temperatura disminuyen con el tiempo. Cuando forman parte de un sistema binario, sin embargo, absorben materia de la estrella vecina y, si alcanzan cierta masa crítica, explotan en forma de supernova.

Una de las virtudes del diagrama de H-R reside en que permite deducir algunas propiedades estelares que no aparecen de manera directa sobre el gráfico. La edad de un cúmulo, por ejemplo, puede estimarse una vez que dibujamos sobre el diagrama los puntos correspondientes a las estrellas que lo componen. En el caso de las Pléyades, la secuencia principal incluye estrellas azules y brillantes; en el cúmulo de las Híades, por el contrario, esta clase de objetos no aparece. Ello nos permite deducir que este último ha de ser más viejo que el primero, puesto que sus estrellas azules y brillantes ya se han extinguido.

FINAL EXPLOSIVO

Una buena parte de la investigación actual persigue explorar los extremos del diagrama de H-R. En la parte inferior derecha se encuentran las estrellas más débiles, más rojas y de menor masa. Los últimos objetos de la secuencia principal, rojos y mortecinos, apenas llegan al ocho por ciento de la masa del Sol. Más allá comienza el territorio de las enanas marrones, astros tan ligeros que no consiguen las condiciones necesarias para iniciar las reacciones nucleares en su interior. Su génesis y propiedades continúan siendo un misterio para los astrónomos [*véase*

Ken Croswell se doctoró en astronomía por la Universidad de Harvard con una tesis sobre las estrellas en el halo de la Vía Láctea. Es también escritor. Su libro *The alchemy of the heavens* («La alquimia de los cielos», 1995) fue finalista del concurso literario de *Los Angeles Times*.



EN SÍNTESIS

No deja de sorprender la gran cantidad de información que puede obtenerse de una estrella a partir de la ínfima fracción de luz que llega a la Tierra. Una herramienta centenaria, el diagrama de Hertzsprung-Russell, es parte del secreto.

En el diagrama se representa la luminosidad frente a la temperatura superficial (o color) de las estrellas. La posición que ocupa un objeto en el gráfico permite determinar en qué fase de su evolución se encuentra.

El diagrama ha ayudado a deducir que las estrellas obtienen su energía a partir de las reacciones de fusión nuclear del hidrógeno y que un gran número de propiedades quedan determinadas, en última instancia, por la masa.

«Origen de las enanas marrones», por S. Mohanty y R. Jayawardhana; Investigación y Ciencia, marzo de 2006].

En el otro extremo, en la esquina superior izquierda, se hallan las estrellas más calientes, brillantes y masivas de la secuencia principal. Pero ¿cuán masivas pueden llegar a ser? Aunque las estrellas muy brillantes resultan fáciles de ver, su estudio reviste dificultades, puesto que son muy escasas. No solo nacen pocas, sino que queman todo su combustible con gran rapidez y explotan al cabo de pocos millones de años [*véase* «La formación de estrellas masivas», por M. T. Beltrán; Investigación y Ciencia, junio de 2011]. Los estudios sobre cúmulos estelares muy jóvenes indican que el límite de masa debería rondar las 150 masas solares. El año pasado, sin embargo, Paul Crowther, de la Universidad de Sheffield, y sus colaboradores anunciaron que habían descubierto una estrella en la Gran Nube de Magallanes (una galaxia enana cercana a la Vía Láctea) tan azul y brillante que, al nacer, su masa debió rondar las 320 masas solares. Algunos se muestran un tanto escépticos, no obstante, puesto que dicha estimación se basa en suponer que el objeto se ajusta a los mismos patrones de masa, luminosidad y temperatura que las estrellas de la secuencia principal.

En todo caso, las primeras estrellas que poblaron el cosmos podrían haber sido aún mayores. Poco después de la gran explosión se sintetizaron solo los tres elementos químicos más ligeros: hidrógeno, helio y litio. El universo primigenio carecía de carbono y oxígeno, los elementos que emiten la luz infrarroja que escapa de las nubes interestelares y que, de esta manera, permiten su enfriamiento y fragmentación. Por tanto, las primeras nubes protoestelares pudieron haber sido mucho mayores y calientes que las actuales, en cuyo caso habrían dado lugar a estrellas cientos de veces más masivas que el Sol [*véase* «Estrellas primigenias», por R. B. Larson y V. Bromm; Investigación y Ciencia, febrero de 2002]. Tales colosos habrían superado con creces los límites actuales de luminosidad y temperatura. En el diagrama de H-R, se hallarían por encima y más a la izquierda que cualquier objeto de la secuencia principal.

Cualquier estrella que, al nacer (una vez que comienzan las reacciones de fusión del hidrógeno), posea una masa superior a ocho veces la del Sol acabará sus días de manera explosiva [*véase* «Supernovas», por W. Hillebrandt, H.-T. Janka y E. Müller; Investigación y Ciencia, diciembre de 2006]. Cada año se registran cientos de explosiones de supernova en otras galaxias. Pero, desde 1604 —antes de que el primer telescopio apuntase al cielo—, no se ha detectado ninguna en la Vía Láctea. ¿Cuándo veremos la próxima?

Sabemos que en nuestra galaxia estallan un par de supernovas cada siglo. Pero eso no significa que podamos verlas; la Vía Láctea es muy extensa —más que la mayoría de las galaxias— y su disco se encuentra plagado de polvo interestelar, el cual puede bloquear la luz de una supernova. De hecho, hace más de medio siglo se descubrió una nube gigante, Casiopea A, formada por los restos de una supernova. Se calcula que la luz de la explosión alcanzó la Tierra a finales del siglo XVII; sin embargo, pasó desapercibida.

Para que una supernova resulte visible, la estrella habría de encontrarse relativamente cerca, en un entorno de unos 20.000 años luz (el diámetro de la Vía Láctea asciende a 100.000 años luz), y el astro debería hallarse en la región superior derecha del diagrama de H-R, la zona de las supergigantes rojas. Las más cercanas y brillantes son Betelgeuse y Antares, a 640 y 550 años luz de la Tierra, respectivamente. Se encuentran lo bastante cerca como para que, en caso de que estallen, sus explosiones rivalicen en brillo con la Luna, pero no tanto como para causar daño a nuestro planeta.



La supergigante roja Betelgeuse pertenece al selecto grupo de estrellas que los astrónomos logran resolver como un disco y no como un mero punto de luz. Esta imagen infrarroja fue captada por el Very Large Telescope del Observatorio Europeo Austral.

P. KERVELLA *ESO*

No obstante, el cosmos siempre depara alguna sorpresa. La famosa supernova que estalló en 1987 en la Gran Nube de Magallanes no provino de una supergigante roja, sino de una azul. En nuestra galaxia también existen algunas estrellas de esta clase, entre las que se encuentran dos de los objetos más visibles del cielo nocturno: Deneb y Rigel.

Otra posibilidad consistiría en observar una de las supernovas que se originan cuando una enana blanca acreta una cantidad suficiente de materia como para acabar explotando. Aunque estas supernovas se producen con menor frecuencia, brillan con mayor intensidad y suelen ocurrir fuera del disco de polvo, lo que facilitaría su detección. De las cinco supernovas que se han registrado en nuestra galaxia desde el año 1000, tres —posiblemente cuatro— fueron causadas por la explosión de una enana blanca. Por desgracia, las enanas blancas brillan tan poco que los candidatos a desencadenar la siguiente supernova no resultan obvios en absoluto.

En todo caso, la luz de la próxima supernova en la Vía Láctea se halla en estos momentos en camino hacia la Tierra. Cuando llegue, los astrónomos representarán la posición de la estrella progenitora en el diagrama de H-R para entender su vida y su muerte. Ejnar Hertzsprung y Henry N. Russell se sentirían honrados de saber que, a día de hoy, su creación aún reviste semejante utilidad. Su éxito ha inspirado diagramas análogos para otros fenómenos, entre los que destacan los exoplanetas. Quizás algún día un gráfico semejante aporte tanta información sobre la Tierra como el diagrama de Hertzsprung-Russell lo ha hecho sobre el Sol.

PARA SABER MÁS

The Cambridge encyclopedia of stars. James B. Kaler. Cambridge University Press, 2006.

Toward understanding massive star formation. Hans Zinnecker y Harold W. Yorke en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 45, págs. 481-563, 2007.

Progenitors of core-collapse supernovae. Stephen J. Smartt en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 47, págs. 63-106, 2009.

The lives of stars. Ken Croswell. Boyds Mills Press, 2009.

How did the first stars and galaxies form? Abraham Loeb. Princeton University Press, 2010.



CAMBIO CLIMÁTICO

El último gran calentamiento global

Nuevos hallazgos revelan que el calentamiento global más abrupto de la historia terrestre fue mucho más lento que el actual. El descubrimiento reviste utilidad para afrontar el futuro

Lee R. Kump

RON MILLER

Lee R. Kump, profesor de ciencias de la Tierra en la Universidad estatal de Pensilvania, es especialista en calentamientos globales.



Los osos polares son la atracción principal en Spitsbergen, la mayor isla del archipiélago de Svalbard, en Noruega. Para mí, sin embargo, el mayor aliciente se encuentra en sus rocas. En verano de 2007 volé a la isla junto con mis colaboradores, un grupo de geólogos y climatólogos, en busca de indicios sobre el que se considera el calentamiento global más abrupto de toda la historia de la Tierra. Desde nuestro barracón, en el antiguo pueblo minero de Longyearbyen, nos aguardaban dos horas de camino hasta los afloramientos donde debíamos buscar dichos indicios. Mientras nos abríamos paso entre resbaladizos montículos de nieve y plantas raquíticas, imaginaba una época en la que las palmeras, los helechos y los caimanes quizá poblaban la zona.

Por aquel entonces, hace unos 56 millones de años, me hubiera visto empapado en sudor en vez de combatiendo el frío. Los estudios han demostrado que, en aquella época, la temperatura del planeta aumentó cinco grados Celsius en apenas unos pocos miles de años —un simple parpadeo en términos geológicos—, lo que dio lugar al Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM). Las zonas climáticas se desplazaron hacia los polos, por lo que los seres vivos marinos y terrestres hubieron de migrar, adaptarse o morir. Las regiones más profundas del medio oceánico se acidificaron y comenzó a escasear el oxígeno, lo que provocó la muerte de numerosos organismos. Los analgésicos naturales de la Tierra tardaron 200.000 años en reducir la fiebre del planeta.

El PETM guarda asombrosas analogías con el cambio climático antropogénico que tiene lugar en la actualidad. El parecido más notable radica en que el PETM se debió a una inyección masiva de gases de efecto invernadero en la atmósfera y los océanos, equiparable en volumen a la que podría generar nuestro consumo de combustibles fósiles a lo largo de los próximos siglos. Por lo tanto, un conocimiento preciso de lo que ocurrió durante el PETM nos ayudará a predecir nuestro futuro. Hasta hace poco, sin embargo, persistían ciertos interrogantes relacionados con el evento que hacían que esas predicciones no pasasen de meras especulaciones. Pero las respuestas obtenidas en los últimos años han puesto de manifiesto que las consecuencias del último gran calentamiento global resultaron mínimas comparadas con aquellas a las que nos enfrentamos ahora. Además, consolidan las predicciones sobre lo que nos deparará el futuro si no hacemos nada por remediarlo.

EFECTO INVERNADERO

Los expertos creen que, al igual que la crisis climática actual, el PETM también comenzó, en cierto modo, con la quema de combustibles fósiles. En aquella época, el supercontinente Pangea se encontraba en sus últimos estadios de expansión y la corteza terrestre se desgarraba en lo que después se convertiría en el Atlántico Nororiental. Enormes masas de roca fundida y un intenso calor ascendieron a través de la masa continental que englobaba Europa y Groenlandia, lo que calentó sedimentos con un alto contenido en carbono y, probablemente, las reservas de carbón y petróleo cercanas a la superficie. Los sedimentos calentados liberaron un volumen enorme de dos de los gases con mayor efecto invernadero: dióxido de carbono y metano. A juzgar por la gran cantidad de erupciones, los volcanes debieron generar una cantidad inicial de gases de efecto invernadero del orden de varios centenares de petagramos (10^{15} gramos) de carbono, lo suficiente como para aumentar la temperatura global un par de grados. Sin embargo, la mayoría de los trabajos de investigación, incluido el nuestro, apunta a la existencia de factores adicionales que condujeron al clímax del PETM.

El calor generado por los volcanes provocó la liberación de otros gases, lo que desencadenó una segunda etapa de calentamiento más intensa que la primera. La dinámica interna de los océanos facilitó la transferencia de calor desde la superficie hasta el frío fondo marino, donde aparentemente se desestabilizaron los enormes depósitos de hidratos de metano congelados bajo los sedimentos. Al deshelarse los hidratos, el metano ascendió hasta la superficie y añadió más carbono a la atmósfera. El metano atmosférico retiene el calor de manera mucho más efectiva que el CO_2. Y aunque se transforma con rapidez en CO_2, durante el tiempo que hubiesen durado las emisiones, la concentración atmosférica de metano se habría mantenido en niveles muy altos. Ello habría intensificado en gran medida el efecto invernadero y el aumento de las temperaturas.

Parece muy probable que, durante la fase de máximo calentamiento inducida por los hidratos, se desencadenasen también mecanismos de liberación del carbono de origen continental. Cuando la materia orgánica se seca, se calienta o se quema, emite gases de efecto invernadero. Las consecuentes sequías que habrían tenido lugar en diversas partes del planeta, incluido lo que hoy es el oeste de EE.UU. o Europa occidental, habrían desecado bosques y zonas de turba. En algunos casos habrían provocado incendios forestales, con la consiguiente liberación de más CO_2 a la atmósfera. En particular, los incendios en zonas con vetas de carbón y turba, de los que sabemos que en épocas recientes han perdurado durante siglos, podrían haber mantenido muy elevados los niveles de emisión.

El deshielo del permafrost en las regiones polares habría agravado la situación. El permafrost es suelo que permanece siempre congelado, por lo que conserva plantas muertas durante millones de años. Podríamos compararlo con una hamburguesa congelada: si se deja sobre la encimera de la cocina, termina pudriéndose. De manera análoga, cuando el permafrost se deshiela, los microorganismos consumen los restos orgánicos y se liberan grandes cantidades de metano. Hoy, se teme que la emisión de metano debida al deshielo del Ártico pueda acelerar el calentamiento inducido por la quema de combustibles fósiles [*véase* «Metano: una amenaza emergente», por Katey W.

EN SÍNTESIS

Hace 56 millones de años, las temperaturas ascendieron 5 grados centígrados en respuesta a una emisión masiva de gases de efecto invernadero.

La intensa emisión de gases tuvo lugar a un 10 por ciento de la tasa a la que hoy se acumulan los gases de efecto invernadero en la atmósfera.

La velocidad del aumento actual tiene más implicaciones que la propia magnitud del cambio, ya que resulta más difícil adaptarse a un cambio rápido.

Anthony; Investigación y Ciencia, febrero de 2010]. La posible contribución del deshielo del permafrost al PETM quizá fuese de mayor envergadura. En aquella época, las temperaturas eran más altas que hoy, por lo que, incluso antes del PETM, la Antártida carecía de la capa glaciar que la recubre hoy. Sin embargo, sí contenía permafrost, gran parte del cual se encontraba «sobre la encimera», listo para el deshielo.

Durante la primera fase de emisión de gases, los océanos absorbieron gran parte del CO_2 (y del metano convertido en CO_2). Este proceso natural de secuestro de carbono ayudó a compensar el calentamiento inicial. Sin embargo, el volumen de gas que acabó incorporándose al océano fue tan grande que produjo un exceso de ácido carbónico, un fenómeno denominado acidificación. Por otra parte, al mismo tiempo que el océano se calentaba, disminuía su contenido en oxígeno (este gas esencial para la vida se disuelve peor en agua caliente que en agua fría). Todos estos cambios resultaron catastróficos para los foraminíferos, organismos microscópicos que habitaban en el fondo marino o en sus sedimentos: el registro fósil demuestra que entre un 30 y un 50 por ciento de las especies se extinguieron.

SEDIMENTOS Y CLIMA

Los primeros indicios de que el PETM fue producto de una espectacular inyección de gases de efecto invernadero llegaron en 1990, cuando se estudió el registro climatológico correspondiente a varios millones de años a partir de los sedimentos extraídos en un sondeo marino en las proximidades de la Antártida. Sin embargo, resultaba difícil deducir datos concretos, como la cantidad exacta de gases emitida, qué gas fue el predominante, cuánto tiempo persistió la emisión y cuál fue su origen.

Durante los años posteriores al descubrimiento, una gran cantidad de expertos analizó centenares de muestras de sedimentos marinos profundos. Cuando se depositan las capas de sedimentos, quedan atrapados minerales —incluidos los restos esqueléticos de la vida marina— que reflejan la composición de la atmósfera y el océano circundantes, así como las formas de vida que existían en el momento de la deposición. La proporción entre los distintos isótopos de oxígeno contenidos en los restos esqueléticos constituye un indicador de la temperatura del agua.

Cuando los materiales presentan un alto grado de preservación, los sedimentos proporcionan un valioso registro de la historia del clima. Pero las muestras con sedimentos correspondientes al PETM no reunían las mejores condiciones. Por lo general, los sedimentos marinos presentan un alto contenido en carbonato de calcio, el mismo compuesto que contienen los comprimidos antiácido. Durante el PETM, la acidificación de los océanos produjo la disolución de gran parte del carbonato de los sedimentos justo en aquellas capas que debían mostrar las condiciones más extremas del PETM.

Por esta razón, en 2007 mis colaboradores y yo nos reunimos en Spitsbergen con otros expertos de Inglaterra, Noruega y Holanda, bajo una iniciativa de la Red Mundial de Universidades. Contábamos con razones para pensar que las rocas de esta región ártica, compuestas casi exclusivamente por lodos y arcillas, podían proporcionarnos un registro más completo para responder a algunas de las preguntas pendientes sobre este calentamiento global prehistórico. No nos proponíamos recoger muestras submarinas, sino tomarlas de una planicie erosionada. Los sedimentos que buscábamos fueron depositados en antiguas cuencas oceánicas. Las fuerzas tectónicas posteriores al PETM se encargaron de elevarlos y emplazarlos por encima del nivel del mar. Después, las glaciaciones los esculpieron para formar abruptas e impresionantes cadenas montañosas surcadas por anchos valles.

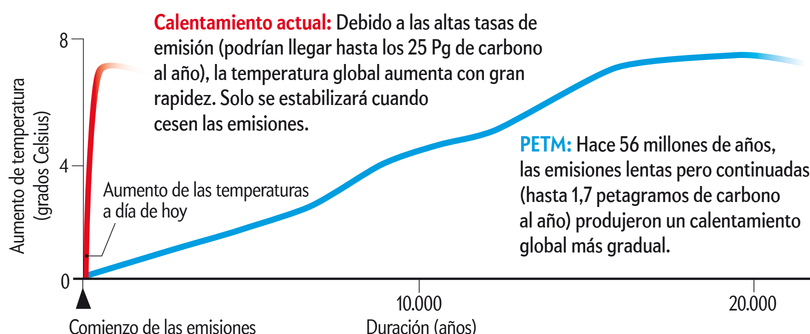
Tras la primera campaña en Longyearbyen, mientras diseñábamos nuevos muestreos y planes de investigación, un golpe de suerte nos ahorró gran parte del trabajo pesado. Un geólogo de la zona nos contó que, unos años atrás, una compañía minera para la que trabajó había extraído muestras de capas de sedimento que incluían materiales correspondientes al PETM. Él decidió conservar varios kilómetros del sondeo, por si algún día podían interesar a alguien. Nos llevó a una nave emplazada en las afueras. Allí se encontraba el sondeo, dividido en secciones cilíndricas de 1,5 metros de longitud y guardadas en cajas planas de madera. Durante el resto de nuestra estancia y a lo largo de una segunda visita en 2008, nuestra labor consistió en tomar muestras de determinados segmentos del sondeo.

Durante los años posteriores, analizamos las muestras en el laboratorio y obtuvimos las características químicas de mayor relevancia para deducir las características del PETM, desde su inicio hasta su conclusión. Para conocer con mayor exactitud la cantidad de gases de efecto invernadero almacenados en la atmósfera, analizamos las variaciones en la composición isotópica del carbono, la cual obtuvimos a partir del estudio de restos de materia orgánica preservada en la arcilla. A partir del análisis de más de doscientas capas contenidas en el sondeo, logramos reconstruir las variaciones de los parámetros químicos a

TASAS DE CAMBIO

Presente y pasado

El ritmo del calentamiento global depende de la rapidez con la que se acumulan los gases de efecto invernadero. Se augura un calentamiento de unos 8 grados Celsius para 2400 si la quema de combustibles fósiles y el secuestro de carbono continúan al ritmo actual. Se estima que las emisiones de carbono lleguen a los 5000 petagramos (Pg), equiparables a las ocurridas durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM). A pesar de que el PETM ha sido considerado como un cambio climático rápido, fue mucho más lento que el actual.



FUENTES: «The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO_2», por David Archer y Victor Brovkin en *Climatic Change*, vol. 90, 2008 (*curva del calentamiento actual*); «Modern rates of fossil fuels burning exceed rates of fossil carbon emission during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum», Ying Cui et al. en *Nature Geoscience*, vol. 4, 2011 (*curva del PETM*); Jen Christiansen (*gráfico*)

lo largo del tiempo. Tal y como sospechábamos, la composición isotópica del carbono cambiaba drásticamente en las capas cuya edad se estimaba en 56 millones de años.

UN PERÍODO DILATADO

Nuestro sondeo ártico presentaba ciertas peculiaridades. No solo era el primero que registraba por completo el calentamiento producido durante el PETM y su posterior recuperación, sino que aportaba datos mucho más precisos que ningún otro sobre el período en que se habían liberado los gases de efecto invernadero a la atmósfera. Sospechábamos que la fidelidad sin precedentes de nuestro registro climático permitiría responder de manera definitiva las preguntas sobre la magnitud, procedencia y duración de la emisión de gases. Sin embargo, no podíamos limitarnos a extrapolar la composición y la concentración de los materiales presentes en el sondeo. Ying Cui, uno de mis estudiantes de doctorado en la Universidad estatal de Pensilvania, empleó un refinado modelo computacional para simular el calentamiento. Este se basaba, por un lado, en lo que sabíamos sobre la variación de la composición isotópica del carbono observada en el sondeo ártico y, por otro, en el grado de disolución del carbonato del fondo oceánico que revelaban los sondeos marinos.

Cui realizó simulaciones en diferentes contextos. Cada una de ellas necesitó un mes de tiempo de cálculo para reproducir la historia completa del PETM. Algunas suponían una mayor contribución por parte de los hidratos de metano; otras daban más peso a las fuentes de CO_2. El caso que más se ajustaba a las pruebas físicas era el que requería la adición de entre 3000 y 10.000 petagramos de carbono a la atmósfera y el océano, más de lo que los volcanes y los hidratos de metano hubieran podido aportar. El permafrost, la turba o el carbón debieron desempeñar algún papel. Nuestra estimación era bastante alta en comparación con las de los estudios anteriores, basados en la composición isotópica de otros sondeos y en otras simulaciones numéricas. Pero lo que más nos sorprendió fue que la emisión de gases había tenido lugar a lo largo de unos 20.000 años, un intervalo de tiempo entre dos y veinte veces mayor que cualquiera de los que se habían propuesto con anterioridad. Eso implicaba que la tasa de emisión durante el PETM fue inferior a dos petagramos al año; es decir, una pequeña fracción de la tasa de emisión de gases de efecto invernadero procedentes de la quema de combustibles fósiles en la actualidad. A día de hoy, de hecho, las concentraciones de CO_2 están aumentando probablemente diez veces más rápido que durante el PETM.

El hallazgo reviste gran importancia de cara al futuro. El registro fósil demuestra que la velocidad a la que se produce un cambio climático ejerce sobre las formas de vida y los ecosistemas un impacto mayor que la magnitud del cambio en sí. Del mismo modo que una persona prefiere recibir un abrazo que un puñetazo en el estómago, la vida responde mejor ante un cambio lento que ante uno brusco. Ese fue el caso del calentamiento que se produjo en el Cretácico (el cual concluyó hace 65 millones de años, cuando el impacto de un asteroide acabó con los dinosaurios). El aumento de temperatura debido a los gases de efecto invernadero en el Cretácico fue similar al del PETM, pero el primero se gestó durante millones de años, mientras que el segundo aconteció en apenas unos miles de años. Durante el Cretácico no se produjeron extinciones de importancia, ya que el planeta y sus pobladores tuvieron tiempo de sobra para ajustarse a los cambios.

El PETM ha sido considerado durante años el ejemplo prototípico del caso opuesto: el cambio climático más rápido del que jamás hayamos tenido noticia, uno que habría rivalizado con los peores pronósticos sobre el calentamiento actual. Visto así, las consecuencias del PETM no resultaron tan desastrosas. Aparte de los foraminíferos, que habitaban en la profundidad de los océanos, el resto de los animales y plantas parecieron sobrevivir a la ola de calor, aunque para ello tuvieran que adaptarse de manera considerable. Algunos organismos disminuyeron de tamaño: los mamíferos del PETM, por ejemplo, eran menores que sus predecesores y sus descendientes. Probablemente adoptasen esa estrategia evolutiva debido a que los cuerpos de menor tamaño disipan mejor el calor. La talla de los insectos excavadores y los gusanos también se redujo.

Otros organismos sobrevivieron gracias a una migración hacia las regiones polares. En el medio marino, los dinoflagelados de la especie *Aspectodinium*, que por lo general habitan en las regiones subtropicales, llegaron hasta el océano Ártico. En la superficie, un gran número de animales que habían permanecido en los trópicos, como tortugas y ungulados, migraron por vez primera hacia América del Norte y Europa. En el caso de los mamíferos, la expansión abrió un amplio abanico de posibilidades evolutivas y de adopción de nuevos nichos ecológicos. Todo ello tuvo una consecuencia fundamental para los seres humanos: la gran diversificación trajo consigo el origen de los primates.

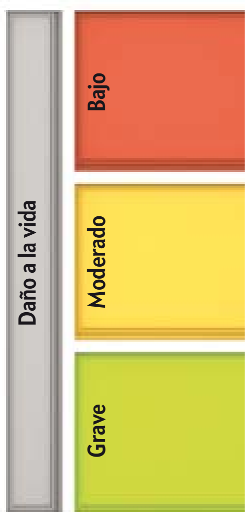
¿DEMASIADO RÁPIDO?

Hoy sabemos que la velocidad a la que se produjo el PETM no fue tan rápida como se pensaba; en el peor de los casos, se trató de un cambio moderado. Por tanto, deberían reconsiderarse los argumentos que restan importancia al empleo actual de combustibles fósiles, esgrimiendo las consecuencias inocuas del PETM sobre la vida. En comparación, el cambio climático actual se produce a una velocidad vertiginosa. En cuestión de décadas, la deforestación, los automóviles y las plantas de carbón

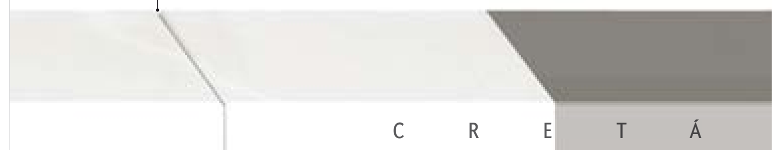
CONSECUENCIAS

Calentamientos previos

Los calentamientos globales rápidos como el actual implican peores consecuencias sobre los seres vivos que los calentamientos lentos. El registro fósil demuestra que el calentamiento gradual que comenzó hace 120 millones de años y duró unos 30 millones de años resultó inocuo comparado con el PETM. Este episodio, unas 1000 veces más abrupto que el anterior, tuvo lugar hace unos 56 millones de años. Investigarlo nos sirve para comprender el calentamiento presente. El aumento actual de las temperaturas se muestra mucho más rápido que durante el PETM, lo que hace pensar que las consecuencias para la vida serán mucho más graves.



Hace 146 millones de años (m.a.)



Calentamiento cretácico (lento)

Tasa de calentamiento: 0,000025 ºC por siglo
Duración: Millones de años
Aumento de las temperaturas: 5 ºC
Causa principal: Erupciones volcánicas
Cambios ambientales: Los océanos absorbieron lentamente el dióxido de carbono, por lo que no se acidificaron
Respuesta de los seres vivos: Casi todos los organismos dispusieron de tiempo para adaptarse o migrar



PETM (moderado)

Tasa de calentamiento: 0,025 ºC por siglo
Duración: Miles de años
Aumento de las temperaturas: 5 ºC
Causa principal: Erupciones volcánicas, metano procedente del fondo oceánico, incendios de turba y carbón, deshielo del permafrost
Cambios ambientales: Acidificación del fondo oceánico
Respuesta de los seres vivos: Algunos organismos del fondo marino se extinguieron, pero la mayor parte de los seres terrestres se adaptaron o migraron



Calentamiento actual (rápido)

Tasa de calentamiento: Entre 1 y 4 ºC por siglo
Duración: Entre decenas y cientos de años
Aumento de las temperaturas: Entre 2 y 10 ºC, previsto para dentro de 200 o 300 años
Causa principal: Quema de combustibles fósiles
Cambios ambientales: Acidificación de los océanos, fenómenos meteorológicos extremos, deshielo glaciar, elevación del nivel del mar
Respuesta de los seres vivos: Migración de numerosas especies hacia las regiones polares, pérdida de hábitats, blanqueo de coral, extinciones



65 m.a. 56 m.a. 34 m.a.

C I C O | PALEOCENO | E O C E N O | Hoy ►

de la época de la Revolución industrial aumentaron las cantidades de CO_2 en más de un 30 por ciento. Hoy emitimos 9 petagramos de carbono a la atmósfera cada año. Las predicciones de crecimiento demográfico y el aumento de la industrialización en los países desarrollados presagian que la tasa podría llegar hasta los 25 petagramos al año antes de que se agoten las reservas de combustibles fósiles.

Los expertos y las autoridades que lidian con los efectos potenciales del cambio climático suelen preocuparse más por los resultados finales: ¿Cuánto hielo se derretirá? ¿Cuántos metros se elevará el nivel del mar? El análisis del PETM nos muestra que la verdadera pregunta es: ¿Con qué rapidez se producen dichos cambios? ¿Tendrán los pobladores del planeta tiempo suficiente para adaptarse? Cuando los cambios tienen lugar muy deprisa, o si existen barreras considerables para la migración o la adaptación, sobrevienen extinciones, la dinámica del planeta se modifica y las consecuencias persisten durante milenios.

Aunque nos encontramos en los estadios iniciales del calentamiento global y resulta difícil predecir lo que nos deparará el futuro, por el momento sabemos algunas cosas. Tal y como recogen los últimos informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, los ecosistemas han mostrado sensibilidad hacia el calentamiento. Existen indicios claros de la acidificación de las aguas superficiales y de sus efectos negativos sobre la vida marina [*véase* «La vida oceánica, amenazada», por Marah J. Hardt y Carl Safina; Investigación y Ciencia, octubre de 2010]. El número de extinciones va en aumento, y el corrimiento de las zonas climáticas ha desplazado ya plantas y animales, lo que a menudo ha supuesto la llegada a algunos territorios de plagas portadoras de enfermedades y de especies invasoras. A diferencia de las plantas y los animales del PETM, la migración de los organismos actuales en busca de un clima más adecuado se encuentra obstaculizada por carreteras, vías férreas, presas y ciudades. En la actualidad, la mayoría de los animales de mayor tamaño se hallan confinados en áreas pequeñas como consecuencia de la pérdida de los hábitats circundantes. Sus posibilidades para migrar a nuevas latitudes para sobrevivir podrían ser nulas.

Por otra parte, el deshielo de los glaciares y las capas de hielo conllevan le elevación del nivel del mar. Los arrecifes de coral se ven sometidos cada vez más a las enfermedades y al estrés térmico. Por último, los episodios de sequías e inundaciones se suceden con una frecuencia cada vez mayor. Los cambios en las precipitaciones y el aumento del nivel del mar debido al deshielo podrían forzar migraciones humanas de magnitudes hasta ahora desconocidas. Algunas ya han comenzado [*véase* «Víctimas del cambio climático», por Alex de Sherbinin, Koko Warner y Charles Ehrhart; Investigación y Ciencia, marzo de 2011].

Las consecuencias del cambio climático actual podrían exceder con creces las del PETM. Sin embargo, quizás estemos a tiempo de evitar la calamidad que nos aguarda. Para ello, se requiere una actuación inmediata de alcance mundial para reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, para así asegurarnos de que el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno continúa siendo el último gran calentamiento global.

RON MILLER (*ilustraciones*); EMILY COOPER (*gráfico*)

PARA SABER MÁS

The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future. Francesca A. McInerney y Scott L. Wing en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 39, págs. 489-516, mayo de 2011.
America's climate choices. Committee on America's Climate Choices, National Research Council of the National Academies. The National Academies Press, 2011.
Slow release of fossil carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. Ying Cui et al. en *Nature Geoscience*, vol. 4, págs. 481-485, 5 de junio de 2011.



Trevor D. Lamb es investigador del departamento de neurociencia en la facultad de investigación médica John Curtin y en el Centro de Excelencia de Ciencia de la Visión del Consejo de Investigación Australiano, en la Universidad Nacional Australiana de Canberra. Sus estudios se centran en los fotorreceptores de la retina de los vertebrados, bastones y conos.

BIOLOGÍA

LA EVOLUCIÓN DEL OJO

Los científicos tienen ahora una visión clara de cómo se formaron nuestros ojos, de una complejidad notable

Trevor D. Lamb

El ojo humano es un órgano extraordinariamente complejo. Funciona como una cámara que capta y enfoca la luz para convertirla en una señal eléctrica que el cerebro traduce en imágenes. Pero, en lugar de una película fotográfica, posee una retina especializada que detecta la luz y procesa la señal mediante varias docenas de tipos de neuronas. El ojo es tan intrincado que desde hace mucho tiempo ha sido utilizado como argumento por los creacionistas y defensores del diseño inteligente, que lo consideran un ejemplo fundamental de lo que denominan complejidad irreductible: un sistema que no puede funcionar en ausencia de alguno de sus componentes y que, por tanto, no pudo haber evolucionado a partir de una forma más primitiva. De hecho, el mismo Charles Darwin reconoció en *El origen de las especies* (la obra de 1859 donde planteaba su teoría de la evolución mediante selección natural) que la idea de que el ojo se hubiera formado por selección natural pudiera parecer absurda. No obstante, creía con firmeza que el ojo había evolucionado de ese modo, a pesar de que en aquella época se carecía de pruebas de la existencia de formas intermedias.

Desde entonces, no se habían obtenido muchas más pruebas al respecto. Mientras que la evolución del esqueleto se ha podido documentar sin dificultad en el registro fósil, las estructuras constituidas por tejidos blandos rara vez se fosilizan. Y, aun en el caso de que lo hagan, los fósiles no suelen conservar el detalle suficiente para establecer la manera en que evolucionaron esos tejidos. A pesar de ello, los biólogos han realizado hace poco avances importantes en la determinación del origen del ojo: al estudiar la formación del órgano en los embriones y comparar la estructura y los genes de diversas especies, han reconstruido el momento en que surgieron sus características clave. Los resultados indican que el ojo humano (el tipo habitual en los vertebrados) tomó forma en menos de 100 millones de años. Evolucionó desde un sencillo detector de luz para los ritmos circadianos (diarios) y estacionales, hace unos 600 mi-

CORTESÍA DE THE EYE-BANK FOR SIGHT RESTORATION, NUEVA YORK (WWW.EYEDONATION.ORG), DAN SAELINGER



llones de años, hasta un órgano muy refinado desde un punto de vista óptico y neurológico, hace 500 millones de años. Más de 150 años después de que Charles Darwin publicara su revolucionaria teoría, estos hallazgos han dado al traste con la complejidad irreductible y respaldan las ideas del naturalista. También revelan que el ojo, lejos de ser un órgano de diseño perfecto, exhibe varios defectos notables, que representarían las cicatrices de la evolución. La selección natural no produce perfección, contrariamente a lo que algunos pudieran pensar. Se apaña con el material del que dispone, a veces con resultados extraños.

Para comprender el origen de nuestros ojos, hay que tener en cuenta varios acontecimientos muy antiguos, que nos remontan a la aparición de la vida en la Tierra, hace cuatro mil millones de años. Los animales pluricelulares sencillos, surgidos hace unos mil millones de años, divergieron en dos grupos. Uno de ellos poseía un plan corporal de simetría radial (con un lado superior y otro inferior, pero sin parte anterior ni posterior); el otro (que dio origen a la mayoría de los animales) era de simetría bilateral, con un lado que era la imagen especular del otro y con un extremo cefálico. Hace unos 600 millones de años, los organismos bilaterales divergieron, a su vez, en dos grupos importantes: uno dio origen a la inmensa mayoría de los animales actuales carentes de espina dorsal, o invertebrados, y otro a nuestro linaje de vertebrados. Poco después de que esos dos linajes se separaran, proliferó una sorprendente diversidad de planes corporales, la denominada explosión del Cámbrico, que dejó su marca indeleble en el registro fósil de hace entre 540 y 490 millones de años. Aquel estallido de evolución estableció los cimientos para la aparición de nuestros ojos complejos.

TIPO COMPUESTO O TIPO CÁMARA

El registro fósil revela que durante la explosión del Cámbrico aparecieron dos estilos de ojo básicamente distintos. El primero correspondía al ojo compuesto que hoy presentan los artrópodos adultos, un grupo de invertebrados entre los que se cuentan los insectos, arañas y crustáceos. Este tipo de ojo se halla constituido por una serie de unidades idénticas formadoras de imágenes; cada una de ellas representa una lente que transmite luz a unos cuantos elementos fotosensibles, los fotorreceptores. Los ojos compuestos resultan muy efectivos en los animales pequeños, ya que ofrecen una visión de amplio ángulo y una resolución espacial moderada en distancias cortas. En el Cámbrico, esa capacidad visual tal vez confirió a los trilobites y a otros artrópodos primitivos una superioridad competitiva sobre sus contemporáneos, visualmente menoscabados. Sin embargo, los ojos compuestos ofrecen escasas ventajas a los animales de gran tamaño, porque necesitarían unos ojos enormes para una visión de elevada resolución. De ahí que, a medida que el tamaño corporal aumentaba, la selección natural favoreciera otra variedad de ojo: el de tipo cámara.

En los ojos de tipo cámara, todos los fotorreceptores comparten una única lente que enfoca la luz; se disponen como una lámina (la retina) que tapiza la superficie interior de la pared del ojo. Calamares y pulpos poseen ojos de tipo cámara semejantes a los nuestros, aunque sus fotorreceptores son del tipo de los insectos. Los vertebrados presentan otra clase de fotorreceptores que, en los gnatóstomos (vertebrados con mandíbulas, entre los que nos incluimos), adquieren dos formas: conos para la visión diurna y bastones para la visión nocturna.

Hace algunos años, Edward N. Pugh, Jr., entonces en la Universidad de Pennsylvania, y Shaun P. Collin, en la Universidad de Queensland, y yo constituimos un equipo para intentar averiguar el modo en que evolucionaron los diferentes tipos de fotorreceptores. Nuestros hallazgos no solo desvelaron esa incógnita; además, nos permitieron dibujar un panorama convincente del origen del ojo en los vertebrados.

RAÍCES PROFUNDAS

Nuestro equipo y otros habíamos observado que muchas de las características distintivas del ojo de los vertebrados son las mismas en todos los representantes vivos de un grupo de vertebrados: los animales mandibulados. Esa coincidencia sugiere que los gnatóstomos heredaron los rasgos de un antepasado común y que nuestros ojos ya se habían formado hace alrededor de 420 millones de años, cuando los primeros representantes de ese grupo (que probablemente se parecían a los peces cartilaginosos actuales, como los tiburones) merodeaban por los mares. Por lo tanto, razonamos que nuestros ojos de tipo cámara y sus fotorreceptores debían tener raíces todavía más profundas. Dirigimos entonces nuestra atención a los vertebrados sin mandíbulas, más primitivos, con los que compartimos un ancestro común desde hace unos 500 millones de años.

Queríamos examinar en detalle la anatomía de esos organismos, por lo que decidimos centrarnos en uno de los pocos animales modernos de ese grupo: la lamprea, un pez anguiliforme cuya boca, en forma de embudo, se halla adaptada para succionar, no para morder. Este pez posee un ojo de tipo cámara completo, con una lente, un iris y músculos oculares. La retina de la lamprea presenta incluso una estructura en tres capas como la nuestra, y sus células fotorreceptoras se asemejan a nuestros conos, aunque en ella no se han formado los bastones, más sensibles. Además, los genes que rigen varios aspectos de la detección de luz, del procesamiento neural y del desarrollo ocular coinciden con los que dirigen estos procesos en los vertebrados con mandíbulas.

Estas asombrosas semejanzas con el ojo de los vertebrados mandibulados resultan demasiado numerosas para haber surgido de forma independiente. Sin duda, un antepasado común a los vertebrados con y sin mandíbulas debió presentar un ojo esencialmente idéntico al nuestro, hace unos 500 millones de años. Llegados a este punto, nos preguntamos si podríamos reconstruir más atrás en el tiempo el origen del ojo y de sus fo-

EN SÍNTESIS

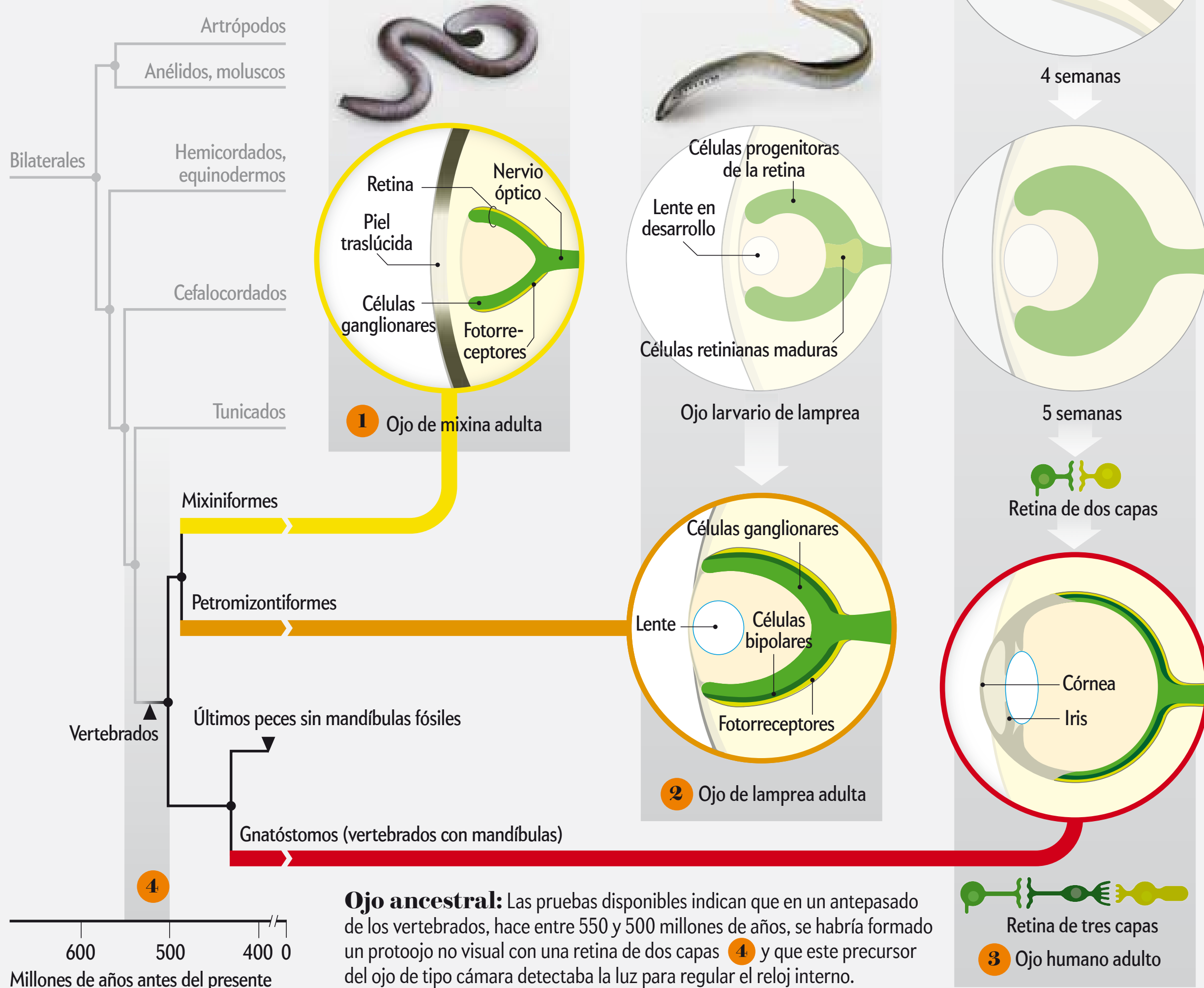
La enorme complejidad de los ojos de los vertebrados hizo sostener a los creacionistas la idea de que estos órganos no pudieron haberse formado mediante selección natural.

Los tejidos blandos rara vez se fosilizan. Pero, mediante la comparación de estructuras oculares y del desarrollo embrionario del ojo en especies de vertebrados, se han realizado importantes descubrimientos sobre el origen del ojo.

Los hallazgos sugieren que nuestro ojo de tipo cámara posee unas raíces muy profundas y que, antes de adquirir los elementos necesarios para operar como un órgano visual, detectaba la luz para modular los ritmos circadianos de nuestros antepasados más antiguos.

Ecos de evolución

La estructura del ojo y el desarrollo embrionario en mixinas y lampreas (vertebrados anguiliformes primitivos) proporciona indicios sobre el origen de nuestros ojos, de tipo cámara, y su funcionamiento en los primeros estadios. Las mixinas poseen ojos rudimentarios sin capacidad de visión. Pero probablemente les sirven para detectar la luz y modular así los ritmos circadianos **1**. En las primeras etapas del desarrollo, el ojo de la lamprea se parece al de la mixina, de estructura simple, antes de metamorfosearse en un ojo complejo de tipo cámara **2**. También el ojo humano recuerda al de la mixina durante el desarrollo: atraviesa una fase en la que la retina presenta solo dos capas, antes de formarse una tercera capa de células **3**. Se sabe que hay aspectos del desarrollo embrionario de un individuo que reflejan los acontecimientos que tuvieron lugar durante la evolución de su linaje.



Ojo ancestral: Las pruebas disponibles indican que en un antepasado de los vertebrados, hace entre 550 y 500 millones de años, se habría formado un protoojo no visual con una retina de dos capas **4** y que este precursor del ojo de tipo cámara detectaba la luz para regular el reloj interno.

JEN CHRISTIANSEN

torreceptores. Lamentablemente, no existen representantes vivos de los linajes que se escindieron del nuestro en los 50 millones de años anteriores, el siguiente período de tiempo que hubiese resultado lógico estudiar. Pero encontramos pistas en el ojo de un animal enigmático, la mixina.

Al igual que las lampreas, con las que guardan un parentesco estrecho, las mixinas son peces anguiliformes y carentes de mandíbulas. Suelen vivir en el fondo oceánico, donde se alimentan de crustáceos y cadáveres de animales marinos. Cuando se sienten amenazadas, exudan una babaza viscosa que les ha valido el apodo de «anguilas pegajosas». Aunque las mixinas son animales vertebrados, sus ojos no presentan las características propias del grupo. Carecen de córnea, iris, lente y de los músculos de sostén habituales. Su retina consta solo de dos capas de células, y no de tres. Además, cada ojo se halla hundido bajo una zona de piel traslúcida. Las observaciones sobre el comportamiento de las mixinas indican que se trata de animales casi ciegos que localizan la carroña con su agudo sentido del olfato.

Las mixinas comparten un antepasado común con las lampreas, el cual, según parece, poseía un ojo de tipo cámara como el de las lampreas. Por tanto, el ojo de la mixina debió degenerar a partir de esa forma más avanzada. Que todavía se man-

Un ojo fósil de más de 500 millones de años

Un nuevo descubrimiento demuestra que algunos de los primeros artrópodos ya habían adquirido una visión tan desarrollada como la de ciertos insectos actuales

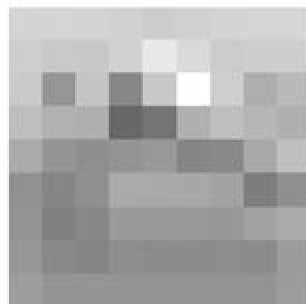
DIEGO GARCÍA-BELLIDO CAPDEVILA

Los ojos compuestos más complejos y antiguos del registro fósil han sido descritos hace poco por un equipo internacional (con base en el Museo de Australia del Sur y con la participación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas). Estos órganos fosilizados, de unos 515 millones de años de antigüedad (período Cámbrico), se han hallado en la localidad de Emu Bay Shale, en la costa norte de la isla Kangaroo, cerca de Adelaida (Australia). En la mayoría de los yacimientos, los fósiles suelen corresponder a las partes mineralizadas de los animales (conchas, exoesqueletos como los de trilobites, o huesos como los de los vertebrados). Pero en los *Lagerstätten*, depósitos sedimentarios con una gran riqueza de fósiles (la más famosa es Burgess Shale, en Canadá, la preservación de los restos de seres vivos resulta excepcional. En estos lugares se han conservado incluso las partes blandas de los cuerpos (tubo digestivo, músculos, vasos sanguíneos... y ojos).

Tal es el caso de Emu Bay Shale, un depósito que se formó pocos millones de años después de la «explosión» de biodiversidad del Cámbrico. Ese fenómeno corresponde a la radiación evolutiva de la que surgieron, hace 540 a 520 millones de años, casi todos los grupos de animales (artrópodos, moluscos, equinodermos y cordados). Hasta ahora, los únicos ojos fósiles bien conocidos de ese período eran los ojos «compuestos» de los trilobites (nuestros ojos tienen una única lente, pero millones de células sensoriales en su interior). Los trilobites corresponden a un tipo extinto de artrópodos (parientes lejanos de cangrejos, escorpiones e insectos). Fueron los animales más diversos de los océanos durante el Paleozoico (hace entre 540 y 250 millones de años).

Sin embargo, los ojos compuestos recién descubiertos son mucho más complejos que ningún otro órgano visual conocido del Cámbrico, y mucho más elaborados que los de los trilobites con los que convivían. Esa mayor complejidad tiene tres vertientes. En primer lugar, mientras los ojos de trilobites de esa edad constaban de menos de 100 lentes (equivalentes a los píxeles en una foto), el fósil australiano contaba con más de 3000, lo que le confería una mayor agudeza visual. (Cabe apuntar que los trilobites aún tardarían otros 40 millones de años en alcanzar un número similar de lentes.) En segundo lugar, las lentes exhibían un diámetro mucho mayor (150 micrómetros), frente a las pequeñas lentes descritas en estos trilobites (entre 20 y 30 micrómetros). Por último, y quizá sea este su aspecto más destacable, los ojos fósiles recién descubiertos presentaban un gradiente en el tamaño de sus lentes, con una zona central de lentes más grandes, o «fóvea» (de mayor sensibilidad lumínica) y una disminución gradual del tamaño hacia la periferia. La fóvea se ha identificado también en algunos artrópodos actuales, especialmente en aquellos que, por sus hábitos depredadores, necesitan una buena visión (moscas cazadoras, libélulas, etcétera). Desconocemos, sin embargo, si los ojos fósiles se hallaban dotados para distinguir colores, ya que solo se ha preservado la córnea (capa externa del ojo), y no las zonas internas de los omatidios (cada una de las unidades del ojo compuesto), donde se albergaban las células sensoriales y los diversos pigmentos que permitirían la visión de los colores.

El patrón hexagonal de la superficie del fósil indica que se trataba de un ojo compuesto de artrópodo, en el que destaca la perfecta con-


Neocobboldia (trilobites, fósil)
84 lentes


Limulus (cangrejo cacerola, actual)
1000 lentes


Ojo de Emu Bay Shale (fósil)
~3000 lentes

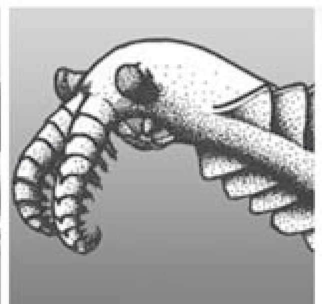

Anax (libélula, actual)
28.000 lentes

Imagen comparativa de la visión de *Anomalocaris*, el mayor depredador del Cámbrico (de más de 1 metro de longitud), percibida por los ojos de varios artrópodos.

DIEGO GARCÍA-BELLIDO

tenga en ese estado disminuido resulta revelador. Se sabe que en los peces cavernícolas ciegos, el ojo puede experimentar una reducción generalizada y llegar a perderse por completo en poco tiempo, unos 10.000 años [*véase* «La evolución de la vida en las cuevas», por Aldemaro Romero, en este mismo número). Pero el ojo de la mixina tiene una antigüedad de cientos de millones de años. Tal persistencia sugiere que, aunque el animal no pueda usar los ojos en la penumbra de las profundidades oceánicas, el órgano ejerce un importante papel en su supervivencia. El descubrimiento tiene además otras implicaciones. El órgano pudo haber adquirido su forma rudimentaria debido a un fallo en el desarrollo, de modo que su estructura actual representaría un estadio evolutivo primitivo. Así, el ojo de la mixina aportaría luz sobre el modo en que operaba el protoojo antes de evolucionar hacia un órgano visual.

Otros datos acerca de la función del ojo de la mixina se obtuvieron al observar más detenidamente su retina. En la retina de los vertebrados, de tres capas, las células de la capa interme-



Ojo compuesto fósil de 515 millones de años de antigüedad, recién encontrado en Emu Bay Shale, Australia (*izquierda*), y ojo actual de la libélula *Anax imperator* (*derecha*).

JOHN PATERSON (*ojo fósil*), DIEGO GARCÍA-BELLIDO (*A. imperator*)

servación del detalle tridimensional original. El gran tamaño de los ojos nos permite deducir que no pertenecieron a la mayoría de los artrópodos típicos de la localidad. El gran depredador del Cámbrico *Anomalocaris* y los trilobites más grandes (*Redlichia*) presentaban ojos de tamaño y forma muy distintos, así que también fueron descartados. Ignoramos, por tanto, cuál era el artrópodo que los poseía. Pero, por las características peculiares de los ojos (una gran agudeza visual y una zona de mayor sensibilidad lumínica), parece lógico pensar que correspondían a un artrópodo activo y cazador, capaz de ver en condiciones de escasa luminosidad, como en las aguas profundas o durante el amanecer y anochecer.

Se demuestra entonces que la visión alcanzó una complejidad extrema (similar a la actual) casi desde el origen de la vida animal, en el Cámbrico. Esta complejidad va de la mano de la función esencial que desempeñaba —y todavía desempeña— este sentido: la capacidad de ver a un depredador o una presa marcaba la diferencia entre la vida y la muerte, o en términos evolutivos, entre la supervivencia y la extinción. La rápida evolución de los ojos «modernos» confirma la importancia de la visión en los primeros animales, así como la rapidez de la selección natural en fijar adaptaciones muy eficientes. Tanto es así, que algunos autores sugieren que la visión fue uno de los motores que impulsaron la radiación animal del Cámbrico.

Diego García-Bellido Capdevila
Depto. de geología sedimentaria y cambio ambiental
Instituto de Geociencias (CSIC)

dia, denominadas células bipolares, procesan la información procedente de los fotorreceptores y comunican los resultados a las neuronas de salida, cuyas señales viajan hasta el cerebro para su interpretación. Sin embargo, la retina de dos capas de la mixina carece de células bipolares y los fotorreceptores se hallan directamente conectados con las neuronas de salida. En este sentido, las conexiones de la retina de este animal se asemejan a las de la glándula pineal de los vertebrados, órgano que segrega hormonas en el cerebro y modula los ritmos circadianos. En los vertebrados no mamíferos, alberga fotorreceptores conectados directamente con neuronas de salida, sin células intermedias; en los mamíferos, esas células han perdido la capacidad de detectar luz.

Sobre la base de este paralelismo con la glándula pineal, mi grupo propuso en 2007 que el ojo de la mixina no interviene en la visión, sino que transfiere señales a la parte del cerebro del animal que regula los ritmos circadianos y ciertas actividades estacionales, como la alimentación y la reproducción. Quizás entonces, el ojo ancestral de los protovertebrados que vivieron hace entre 550 y 500 millones de años sirviera primero como un órgano no visual; solo más tarde adquirirían la capacidad de procesamiento neural y los componentes ópticos y motores necesarios para la visión espacial.

Los estudios del desarrollo embrionario del ojo de los vertebrados respaldan esta hipótesis. Durante el estadio larvario, la lamprea vive en el lecho de un río y, como la mixina, es ciega. En esa fase, su ojo se parece al de la mixina: presenta una estructura simple y se halla incrustado bajo la piel. Cuando la larva experimenta la metamorfosis, el ojo rudimentario crece considerablemente y desarrolla una retina de tres capas; se forman también una lente, la córnea y los músculos de sostén. Después, el órgano asciende a la superficie, como el ojo de tipo cámara de un vertebrado. Puesto que muchos aspectos del desarrollo de un individuo reflejan acontecimientos que tuvieron lugar durante la evolución de sus antepasados, podemos, con prudencia, utilizar el desarrollo ocular de la lamprea para reconstruir la evolución del ojo.

El desarrollo embrionario de los ojos de los mamíferos ofrece también pistas reveladoras acerca del origen evolutivo de este órgano. El equipo de Benjamin E. Reese, de la Universidad de California en Santa Bárbara, ha descubierto que las conexiones de la retina en los embriones de mamíferos se establecen de un modo semejante al de las mixinas, con los fotorreceptores conectados directamente a las neuronas de salida. Después, a lo largo de un período de varias semanas, las células bipolares maduran y se insertan entre los fotorreceptores y las neuronas. Esta secuencia corresponde al patrón de desarrollo que cabría esperar si la retina de los vertebrados hubiera evolucionado a partir de un órgano circadiano de dos capas que más tarde hubiera adquirido la capacidad de procesamiento y elementos para la formación de imágenes. Resultaría, por tanto, verosímil que este estadio de desarrollo temprano representara una reminiscencia de un período de la evolución anterior a la introducción de las células bipolares en la retina, así como de la lente, la córnea y los músculos de sostén.

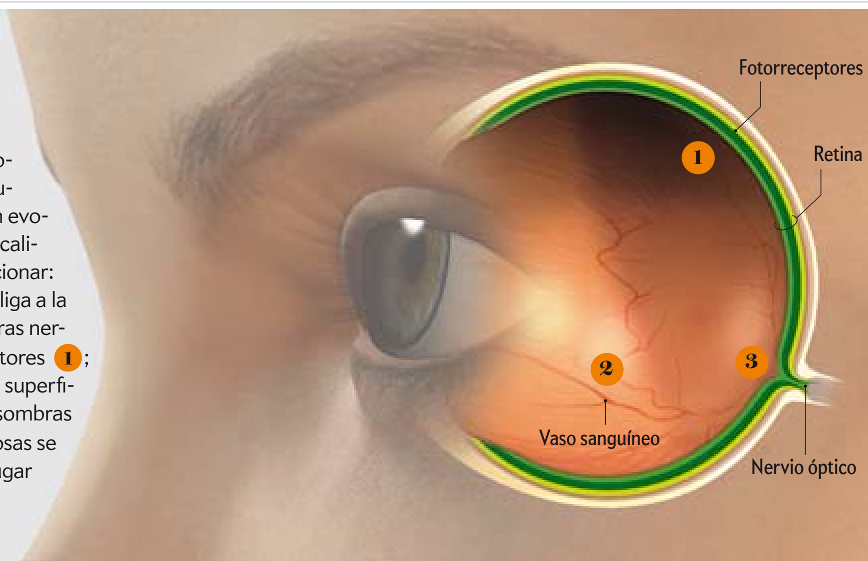
APARICIÓN DE LOS RECEPTORES

Mientras estudiábamos el desarrollo de las tres capas de la retina, se nos ocurrió otra cuestión relacionada con la evolución del ojo. En todo el reino animal, las células fotorreceptoras pertenecen a dos clases: rabdoméricas y ciliares. Hasta hace poco, se pensaba que los invertebrados utilizaban el tipo rabdomérico, mientras que los vertebrados empleaban el tipo ciliar. Pero en realidad la situación es más complicada. En la inmensa mayoría de los organismos, los receptores ciliares se encargan de captar la luz para fines no visuales, como la regulación de los ritmos circadianos. En cambio, los receptores rabdoméricos perciben la luz con la finalidad expresa de la visión. Los ojos compuestos de los artrópodos y los ojos de tipo cámara de los moluscos como el pulpo, que evolucionaron independientemente de los ojos de tipo cámara de los vertebrados, emplean fotorre-

PRUEBAS

Cicatrices de la evolución

El ojo de los vertebrados, lejos de ser el producto de un diseño inteligente, contiene numerosos defectos que atestiguan su origen evolutivo. Algunos de estos fallos degradan la calidad de la imagen, entre los que cabe mencionar: la disposición invertida de la retina, que obliga a la luz a atravesar los somas celulares y las fibras nerviosas antes de incidir sobre los fotorreceptores (1); los vasos sanguíneos se extienden sobre la superficie interior de la retina, con lo que emiten sombras indeseables sobre ella (2); las fibras nerviosas se reúnen y atraviesan la retina en un único lugar para formar el nervio óptico, con lo que se crea un punto ciego (3).



DON FOLEY

ceptores rabdoméricos. Sin embargo, los ojos de los vertebrados se sirven de fotorreceptores ciliares para la visión.

En 2003, Detlev Arendt, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular de Heidelberg, demostró que nuestros ojos todavía conservan formas heredadas de los fotorreceptores rabdoméricos, que se han modificado mucho y han dado lugar a las neuronas de salida que envían información de la retina al cerebro. Dicho descubrimiento significa que nuestra retina alberga formas heredadas de ambas clases de fotorreceptores: la clase ciliar, que siempre ha estado constituida por fotorreceptores, y la clase rabdomérica, transformada en neuronas de salida. Forzar a una estructura existente para que adquiera una nueva función representa la base de la evolución, por lo que el descubrimiento del distinto papel de los fotorreceptores ciliares y rabdoméricos en nuestros ojos y en los de los invertebrados refuerza la idea de que el ojo de los vertebrados se construyó por procesos naturales. Pero nos preguntábamos qué tipo de presiones ambientales habrían impelido a esas células a adoptar la nueva función.

Para intentar comprender por qué los fotorreceptores ciliares se convirtieron en eficaces sensores de luz en la retina de los vertebrados, mientras que la clase rabdomérica se transformó en neuronas de proyección, analicé las propiedades de sus pigmentos fotosensibles respectivos, o rodopsinas (que deben su nombre a la molécula proteica que contienen, la opsina). En 2004, el grupo de Yoshinori Shichida, de la Universidad de Kyoto, había demostrado que en la evolución inicial de los pigmentos visuales de los vertebrados había tenido lugar un cambio que confirió mayor estabilidad, y por tanto mayor actividad, a la forma fotosensible del pigmento. Propuse que dicho cambio bloqueaba, asimismo, la ruta de la reconversión de la rodopsina activada en su forma inactiva, que en la rodopsina rabdomérica emplea la absorción de un segundo fotón de luz; se necesitaba entonces una ruta bioquímica que restableciera en la molécula su disposición a señalar la luz. Según mi hipótesis, una vez estos dos elementos estuvieron en su lugar, los fotorreceptores ciliares habrían tenido una ventaja clara sobre los fotorreceptores rabdoméricos en ambientes como el océano profundo, con una escasa iluminación. Como resultado, algunos cordados primitivos (antepasados de los vertebrados) habrían podido colonizar nichos ecológicos inaccesibles a los animales que solo presentaban fotorreceptores rabdoméricos; no debido a que la opsina ciliar mejorada proporcionara una mejor visión —los otros componentes esenciales del ojo de tipo cámara todavía no se habían formado—, sino porque aumentaba la eficacia de la percepción de la luz que determina los ritmos circadianos y estacionales.

En esos cordados primitivos que medraban en ambientes oscuros y poseían fotorreceptores ciliares, los fotorreceptores rabdoméricos, menos sensibles, habrían resultado prácticamente inútiles. Por ello no habrían tenido ninguna dificultad en adoptar un nuevo papel: el de neuronas que transmiten señales al cerebro. (En este punto, ya no necesitaban opsina; la selección natural la habría eliminado de esas células.)

NACE UN OJO

Una vez nos formamos la idea de cómo se originaron los componentes de la retina de los vertebrados, queríamos conocer el modo en que se transformó el ojo, desde un órgano sensible a la luz, pero no visual, hasta otro formador de imágenes, hace unos 500 millones de años. De nuevo, los embriones en desarrollo nos proporcionaron pistas. En las primeras etapas del desarrollo, la estructura neural que da origen a los ojos produce una protuberancia a cada lado para formar dos sacos, o vesículas. A continuación, cada una de las vesículas se pliega sobre sí misma para formar una retina en forma de C que tapiza el interior del ojo. Probablemente, la evolución del ojo se produjo de una manera muy similar. Postulamos que en un antepasado de los vertebrados, hace entre 550 y 500 millones de años, habría aparecido un protoojo (con una retina en forma de C, de dos capas, compuesta por fotorreceptores ciliares en el exterior y por neuronas de salida derivadas de fotorreceptores rabdoméricos en el interior) que habría servido para regular su reloj interno y quizá le habría ayudado a detectar sombras y orientar su cuerpo.

En el estadio siguiente de desarrollo embrionario, a medida que la retina se pliega sobre sí misma, se forma la lente. Se origina como un engrosamiento de la superficie externa del embrión, o ectodermo, que sobresale en el espacio curvo y abierto formado por la retina en forma de C. Esta prominencia acaba

por separarse del resto del ectodermo para convertirse en un elemento independiente. Cabría pensar que a lo largo de la evolución se produjo una secuencia similar de cambios. No sabemos con exactitud el momento en que tuvo lugar esa modificación, pero en 1994, investigadores de la Universidad de Lund demostraron que los elementos ópticos del ojo habrían aparecido en el lapso de un millón de años. Si fue así, el ojo formador de imágenes se habría originado a partir del protoojo no visual en un instante geológico.

Con la aparición de la lente o cristalino, que permitió captar la luz y enfocar las imágenes, la capacidad del ojo para obtener información aumentó de manera espectacular. Ello debió crear presiones de selección que habrían favorecido una mejora en el procesamiento de las señales en la retina, más allá de lo que permitía la simple conexión de los fotorreceptores con las neuronas de salida. La evolución hizo frente a esa necesidad y modificó el proceso de maduración celular: algunas células en desarrollo, en lugar de formar fotorreceptores ciliares, se convirtieron en células bipolares retinianas que se insertaron entre la capa fotorreceptora y la capa de neuronas de salida. De ahí que las células bipolares de la retina se parezcan tanto a los conos y bastones, aunque carezcan de rodopsina y no sean activadas por la luz, sino por sustancias liberadas por los fotorreceptores (neurotransmisores).

Aunque los ojos de tipo cámara proporcionan un amplio campo de visión (unos 180 grados), en la práctica nuestro cerebro solo puede procesar una parte de la información disponible en un momento dado, lo que se debe al número limitado de fibras nerviosas que conectan nuestros ojos con el cerebro. No hay duda de que los primeros ojos de tipo cámara se enfrentaron a una limitación más grave todavía, porque seguramente poseían aún menos fibras nerviosas. Sin duda se produjo una fuerte presión selectiva a favor de la aparición de músculos que confirieran movilidad al ojo. Tales músculos ya debieron existir hace 500 millones de años, porque su disposición en la lamprea, cuya estirpe se remonta a dicha época, es casi idéntica a la de los vertebrados con mandíbulas, entre ellos los humanos.

A pesar de las innovaciones que la evolución introdujo en el ojo de los vertebrados, hay varios rasgos que decididamente resultan toscos. Uno de ellos es la colocación invertida de la retina, lo que obliga a la luz a atravesar todo su grosor (a través de las fibras nerviosas y somas celulares interpuestos, que dispersan la luz y degradan la calidad de la imagen) antes de alcanzar los receptores fotosensibles. Además, los vasos sanguíneos que tapizan la superficie interna de la retina emiten sombras indeseables sobre la capa fotorreceptora. Por otro lado, la retina posee un punto ciego en el que se congregan las fibras nerviosas que recorren su superficie, lugar en el que atraviesan la retina y aparecen detrás de la misma en forma de nervio óptico.

Dichos defectos no constituyen rasgos inevitables de un ojo de tipo cámara; en los pulpos y calamares, la evolución produjo de manera independiente ojos sin esos fallos. Considerar el ojo de los vertebrados en un contexto evolutivo revela que sus imperfecciones aparentemente absurdas responden a una antigua secuencia de sucesos, cada uno de los cuales aportó una ventaja a nuestros antepasados vertebrados incluso antes de que pudieran ver. El diseño de nuestros ojos no es inteligente, pero cobra todo su sentido cuando se contempla bajo la brillante luz de la evolución.

PARA SABER MÁS

Evolution of the vertebrate eye: Opsins, photoreceptors, retina and eye cup. Trevor D. Lamb et al. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 8, págs. 960-975, diciembre de 2007.

The evolution of eyes. Número especial de *Evolution: Education and Outreach*, vol. 1, n.º 4, págs. 351-516, octubre de 2008.

The evolution of phototransduction and eyes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 364, n.º 1531, págs. 2789-2967, 12 de octubre de 2009.

Modern optics in exceptionally preserved early Cambrian arthropod eyes from Australia. Michael Lee, Jim Jago, Diego García-Bellido, Greg Edgecombe, Jim Gehling y John Paterson en *Nature*, vol. 474, págs. 631-634, junio de 2011.

Aldemaro Romero es decano de la facultad de artes y ciencias y profesor de biología en la Universidad del Sur de Illinois en Edwardsville. Una de sus áreas de investigación es la biología evolutiva de los organismos cavernícolas, en particular de los peces.



EVOLUCIÓN

Peces cavernícolas

Nuevos conceptos ponen en duda las ideas tradicionales acerca de la vida subterránea

Aldemaro Romero

En una anécdota famosa de la historia de la biología se cuenta que un alumno del naturalista francés Georges Cuvier apareció en el dormitorio de este vestido como un diablo, provisto de cuernos y pezuñas, y le dijo «¡Cuvier, Cuvier, voy a comerte!». Cuvier se quedó mirando a la aparición y contestó: «Cuernos, pezuñas, cola: herbívoro. No puedes comerme».

El relato resume la relación que solemos establecer entre formas de vida y estilos de vida. Se supone que los animales con ojos grandes son nocturnos, las plantas con hojas grandes son propias de ambientes tropicales húmedos, y así sucesivamente. Por ello, es fácil imaginar que todos los animales cavernícolas han de ser ciegos y despigmentados; después de todo, ¿qué necesidad de ojos y pigmentación tiene un animal que vive en la oscuridad perpetua?

Las investigaciones realizadas durante los últimos decenios indican que bajo tierra las cosas no resultan tan sencillas; que, en realidad, la ecología del ambiente cavernícola presenta una enorme diversidad y que los procesos evolutivos que rigen la adaptación a dicho ambiente ocultan sorpresas, incluso cuando se explican en términos darwinistas modernos.

Hay cuevas de las todas formas y tamaños, desde cavernas y tubos de lava hasta grutas de hielo. Algunas zonas profundas resultan inaccesibles a los humanos, como ciertos lagos y ríos subterráneos, denominados ambientes freáticos (del griego *phrear*, «cisterna» o «pozo»). Las cuevas más comunes son kársticas, o de caliza. Puesto que esta roca es muy soluble (contiene al menos un 50 por ciento de carbonato cálcico), el karst es moldeado por el agua de lluvia, ligeramente ácida. Este tipo de paisaje cubre el 15 por ciento de la superficie emergida de la Tierra. En Europa se han descrito cien mil cuevas; en Estados Unidos, unas cincuenta mil.

Desde bacterias hasta mamíferos, en los ambientes de las cuevas se han descrito decenas de miles de especies vivas, y quedan todavía otras muchas por descubrir. En los últimos años hemos abordado la exploración de la rica biota de las cuevas tropicales, en general poco estudiada.

Los bioespeleólogos suelen dividir el mundo en dos: los ambientes epigeos (de *epi*, «encima», y *geos*, «Tierra») y los hipogeos (de *hypo*, «debajo»). Los primeros se refieren a las zonas expuestas de manera regular a la luz directa o indirecta; los segundos representan cualquier parte de la biosfera que se halle bajo tierra. El ambiente hipogeo incluye el del suelo (edáfico o intersticial), el freático o artesiano, y el de las cuevas. El término *cueva* se reserva a aquellos hábitats subterráneos que pueden ser explorados directamente por los humanos.

El grado de exposición a la luz es uno de los rasgos que caracterizan el mundo hipogeo. Un caso fascinante de la bioespeleología es la existencia de cuevas con aberturas superiores que permiten la entrada de luz. En estas áreas iluminadas se pueden descubrir organismos con ojos y pigmentados como los que medran fuera de las cuevas. En ocasiones se trata de especies

EN SÍNTESIS

Las cuevas constituyen un hábitat singular donde los organismos se han adaptado a la limitación principal de este medio: la ausencia de luz.

Los animales suelen presentar troglomorfismos, rasgos asociados a la vida subterránea, que suelen consistir en la reducción o desaparición de ciertas estructuras o funciones, como la despigmentación y la ceguera. Pero esta norma no es generalizable a todos los organismos.

Se ha descubierto, en cambio, que la ecología del ambiente cavernícola genera una enorme variabilidad entre especies, por lo que resulta imposible definir un fenotipo hipogeo universal.

Las nuevas formas se originan por selección natural, no por el simple deterioro de un fenotipo. La rápida evolución de las especies troglomórficas se sustenta sobre su elevada plasticidad fenotípica.



El tetra cavernícola ciego, *Astyanax fasciatus*, muestra un rasgo morfológico clásico de la vida en la oscuridad: la carencia de ojos. El mismo Darwin intentó explicar lo que denominaba «rudimentación», o pérdida de un aparato morfológico debida a la evolución bajo tierra.

MARTIN SHIELDS/PHOTO RESEARCHERS

epigeas típicas; otras veces, corresponden a formas con ojos y pigmentadas de especies hipogeas.

Un ejemplo de la diferenciación morfológica entre individuos de la misma especie es el pez carácido *Astyanax fasciatus*, un tetra que vive en la cueva Sótano del Caballo Moro, en México. En algún momento del pasado, una fracción del techo de la cueva se hundió, y una parte de uno de sus lagos subterráneos quedó expuesta a la luz. Los individuos ciegos y despigmentados viven de preferencia en el lado oscuro, mientras que los peces con ojos y pigmentados se concentran en el lado iluminado.

Los organismos hipogeos se agrupan según su morfología y comportamiento. El sistema de clasificación más aceptado define a los organismos troglobios como los que siempre muestran troglomorfismos, es decir, características (*caracteres*, en el lenguaje de los taxónomos) asociadas a las cuevas, tales como ausencia de visión y de pigmentación; los organismos troglofílicos exhiben cierta reducción de dichos caracteres; los trogloxenos conservan esos caracteres a pesar de que su vida transcurre en gran parte en cuevas (como algunas especies de murciélagos), y los accidentales son los que aparentemente se hallan en las cuevas por casualidad, no porque vivan normalmente en ellas.

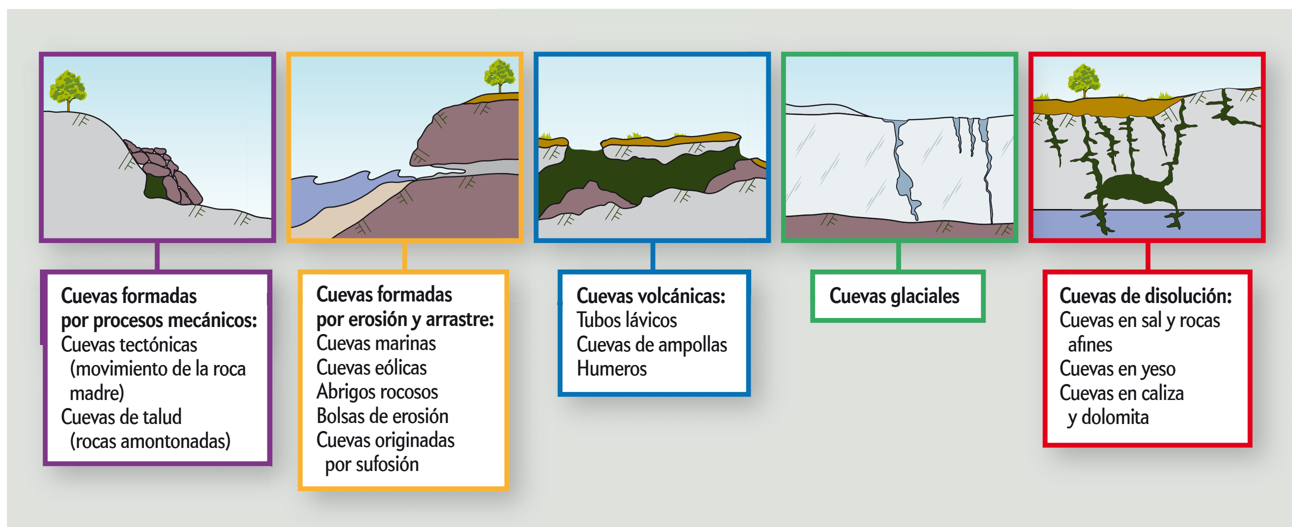
¿EXISTE UN ARQUETIPO HIPOGEO?

En su búsqueda de una definición arquetípica de los organismos cavernícolas, los bioespeleólogos se han obsesionado con troglomorfismos tales como la ceguera y la despigmentación. Pero cabe preguntarse: ¿existe realmente un arquetipo hipogeo que encaje en la mayoría de los organismos de vida subterránea, si no en todos? Y si es posible definir un tal arquetipo, ¿acaso tiene un significado evolutivo importante?

El primer obstáculo para aceptar un arquetipo hipogeo es que los caracteres fenotípicos de esos organismos pueden hallarse disminuidos, pero también aumentados o destacados. Las reglas no son constantes. La mayoría de los cambios en los caracteres morfológicos se asocian a la ausencia de luz. La reducción de los órganos visuales, ya se trate de ojos u ocelos (órganos oculares primitivos de algunos invertebrados), se considera una regla para los organismos troglomórficos; pero hay muchas excepciones. Una es el pez ciprínido *Sinocyclocheilus macrophthalmus*. Las especies del mismo género que medran en cuevas de China son ciegas o poseen ojos reducidos y están despigmentadas; pero este pez cavernícola, aunque carece de pigmentación, posee ojos mayores que los de cualquier otra especie del género, incluidas las epigeas. Tener ojos grandes es una adaptación insólita para los peces cavernícolas, pero resulta habitual entre los vertebrados nocturnos.

El mayor tamaño de los órganos sensoriales tampoco representa la norma entre los organismos troglomórficos: mientras que la mayoría de los peces gato hipogeos suelen poseer barbillones (órganos sensoriales parecidos a vibrisas cerca de la boca) mayores que los de sus antepasados epigeos, en el pez gato freático de Texas, *Trogloglanis pattersoni*, ciego, esos apéndices son diminutos. De manera similar, la tasa metabólica tiende a ser menor en los troglomorfos; pero el tetra cavernícola mexicano *Astyanax fasciatus* presenta una tasa metabólica casi el doble que la de su forma epigea.

Los troglomorfismos como la ceguera y la despigmentación pueden exhibir una enorme variabilidad entre especies. En una muestra cuidadosamente seleccionada de 86 especies de peces



Las cuevas se forman en la Tierra como consecuencia de procesos de excavación, erosión, desgaste, amontonamiento, disolución o flujos volcánicos. Los organismos que logran introducirse en ellas dejan atrás factores de estrés, como los depredadores naturales. Pero también deben superar obstáculos ecológicos importantes: además de la oscuridad total, una energía reducida en el ecosistema, una biodiversidad escasa y una hidrología peculiar. Aun así, la mayoría de las cuevas albergan una biota próspera.

troglomorfos, mi equipo observó que solo siete de ellas mostraban el mismo grado de troglomorfismo para cada uno de los caracteres analizados (ojos, pigmentación y escamas). Además, cuando los caracteres se combinaban en un paisaje fenotípico, los resultados indicaban una mezcla diversa de grados de desarrollo, lo que restaba validez a la hipótesis de que los caracteres troglomórficos se forman en paralelo. Para explicar tal mosaico de morfologías, sin duda hemos de tener en cuenta la historia evolutiva de las especies implicadas y las características peculiares del ambiente en el que viven.

Otra observación añade complejidad al tema: un gran número de especies hipogeas no muestra ninguna clase de troglomorfismos. Hasta agosto de 2008 se habían descrito 299 especies de peces de ambientes hipogeos, 184 de las cuales presentaban algún tipo de troglomorfismo. En otras palabras, alrededor de un tercio de las especies hipogeas de peces tienen ojos y son pigmentadas.

Además, no todos los troglomorfismos pueden explicarse como una consecuencia directa de la ausencia de luz, como la reducción o pérdida de escamas en los peces cavernícolas. En cambio, resulta más fácil hallar una explicación funcional a la disminución del tamaño de la vejiga natatoria (llena de gas) en los peces hipogeos. Las aguas hipogeas suelen ser muy someras, de modo que el valor adaptativo de dicho órgano desaparece.

La información resumida hasta aquí apunta a un panorama complejo y contradictorio en el que no caben las generalizaciones sobre los fenotipos de la fauna hipogea. Dicho de otro modo, no existen organismos hipogeos arquetípicos. No podemos realizar generalizaciones empíricas robustas sobre el efecto de cada rasgo en la eficiencia biológica individual. La selección natural no admite predicciones tan sencillas.

LLEGAR HASTA ALLÍ

La colonización de los ambientes hipogeos es un fenómeno biológico plagado de controversia y especulación, a lo que ha contribuido su difícil estudio en condiciones naturales. Además, la mayoría de los bioespeleólogos, cuya experiencia de campo está limitada en gran parte a cuevas templadas, de poca energía, siempre han supuesto que la ocupación de un hábitat pobre en nutrientes no conlleva ventajas a un organismo. Por lo tanto, muchos piensan que la colonización del ambiente hipogeo se produce por accidente u otra circunstancia insólita. Pero las observaciones de campo contradicen tal idea. Parte de la argumentación a favor de la colonización casual es que los organismos quedan atrapados en los ambientes hipogeos. Pero ya se trate de animales que lleguen allí volando, como los insectos; deslizándose apresuradamente, como los artrópodos; o arrastrándose, como las salamandras, pocas razones les impedirán retornar por la misma ruta a su hábitat original. La hipótesis de la llegada por accidente representa una generalización poco sólida del proceso de colonización de las cuevas.

¿Existen observaciones de campo que contribuyan a explicar la colonización del ambiente hipogeo? En un estanque de Costa Rica que recibe agua de un manantial freático, una fuente cuya salida es invisible al hallarse debajo de un salidizo bajo de roca, mi equipo describió unos 120 tetras mexicanos epigeos, *A. fasciatus*. Los peces presentaban una morfología idéntica a la de otros tetras epigeos, con ojos completos y pigmentación. Pero, a diferencia de la población epigea típica, la del estanque no formaba cardúmenes. El comportamiento gregario suele perderse en los peces cavernícolas. Además, cuando dejamos caer comida en la superficie del agua, los tetras, casi sin excepción, empujaron la comida hasta el hábitat subterráneo antes de consumirla. Diversas observaciones de campo y manipulaciones experimentales del entorno demostraron que los peces no solo arrastraban el alimento hacia la cavidad subterránea, sino que también se refugiaban allí durante la noche para huir de los murciélagos pescadores de la especie *Noctilio leporinus*. Ello sugería que *A. fasciatus* se hallaría en pleno proceso de colonizar las aguas subterráneas como respuesta a presiones selectivas, no por exposición accidental.

La idea de la colonización activa se ha propuesto también para las grutas de hielo de las regiones templadas. (Las cuevas de hielo se caracterizan por la presencia de cierta cantidad de hielo du-

AMERICAN SCIENTIST

Adaptación a la vida subterránea

Los troglomorfismos son caracteres asociados a los organismos de las cuevas. Consisten en cambios adaptativos en la estructura y función de los órganos, el metabolismo, el ciclo biológico y el comportamiento. La mayoría de los cambios en los rasgos morfológicos se asocian a la ausencia de luz.

La tabla muestra que los caracteres fenotípicos de los organismos suelen reducirse o desaparecer, pero también pueden hallarse aumentados o destacados. Las reglas no son constantes.

	Caracteres morfológicos	Caracteres fisiológicos	Caracteres conductuales
Se reducen o se pierden	Ojos, ocelos (ojos primitivos de los invertebrados) Centros cerebrales de la visión Pigmentación Órgano pineal Tamaño corporal Cutículas (artrópodos terrestres) Escamas (peces) Vejiga natatoria (peces)	Metabolismo Ritmo circadiano Fecundidad Volumen del huevo	Fotorrespuestas Agregación Respuesta a sustancias de alarma Agresión
Aumentan	Quimiorreceptores y mecanorreceptores Apéndices Tamaño corporal	Duración de la vida Almacenamiento de lípidos	

rante todo el año.) Las salamandras pletodóntidas de la meseta de Cumberland, en Georgia noroccidental, utilizan tanto los hábitats epigeos como los cavernícolas, y entran en las cuevas para evitar las condiciones cálidas y secas del ambiente epigeo.

Cabe mencionar que algunas poblaciones troglomórficas pueden ser sustituidas ecológicamente por otras epigeas, a veces con gran rapidez, e incluso si la forma epigea es el supuesto antepasado de la población hipogea en cuestión. Tal es el caso de la población hipogea del pez gato *Rhamdia quelen* de una cueva de Trinidad, descrita en 1926. Sobre la base de sus ojos y pigmentación reducidos se designó como un género y especie troglomórficos nuevos, *Caecorhamdia urichi*. A partir de la década de los cincuenta del siglo xx, se recolectaron en la cueva diversos ejemplares que exhibían variabilidad en el tamaño de los ojos y la pigmentación. Estudios posteriores indicaron que esa población cavernícola formaba parte, desde el punto de vista taxonómico, de la del pez gato epigeo *Rhamdia quelen*, de amplia distribución, con ojos y pigmentado. En 2000 y 2001 mi grupo examinó todos los individuos disponibles en la cueva y los museos. Los resultados indicaban que la población troglomórfica había sido sustituida por la epigea en un período muy corto: 50 años. La razón más probable de esa sustitución habría sido la invasión de individuos epigeos de *R. quelen* propiciada por cambios en los regímenes de precipitación. Los individuos epigeos, gracias a su mayor tamaño, comportamiento más agresivo y naturaleza generalista de la alimentación, estaban mejor adaptados que los individuos troglomórficos, y los desplazaron.

Otra cuestión que se plantea con frecuencia se refiere a las especies cavernícolas que habitan en varias cuevas, conectadas o no. ¿Son tales poblaciones el producto de un único acontecimiento de colonización seguido de dispersión hipogea, o bien son el resultado de múltiples sucesos de colonización? Estudios genéticos moleculares de crustáceos, insectos y peces cavernícolas hacen pensar que las cuevas se hallan sometidas a invasiones múltiples por las mismas especies epigeas.

PREADAPTACIÓN

¿Hay especies con más probabilidad de colonizar con éxito el medio hipogeo? ¿Por qué algunas especies hipogeas experimentan cambios fenotípicos importantes, mientras que otras permanecen similares a sus antepasados epigeos?

Una idea bastante aceptada en bioespeleología es la preadaptación. Según esta, muchos organismos poseen rasgos que les permiten adaptarse fácilmente a un ambiente o a un modo de vida determinados; así, los animales nocturnos deberían estar «preadaptados» al ambiente oscuro de las cuevas. Pero ¿acaso existen pruebas convincentes de que un organismo ha de estar preadaptado para colonizar con éxito un ambiente hipogeo?



Los órganos de este dipluro se ven perfectamente a través de su cutícula despigmentada. Hay un centenar de especies de dipluros hipogeos como este, todas ellas ciegas y despigmentadas. Las cien especies exhiben una notable semejanza, a pesar de pertenecer a dos familias diferentes, un ejemplo de la evolución convergente en las cuevas.

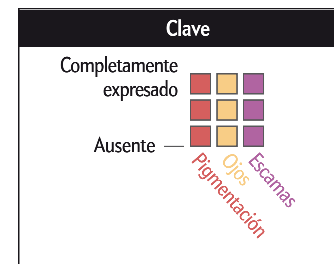
SEGÚN K. A. CHRISTIANSEN EN *THE NATURAL HISTORY OF BIOSPELEOLOGY*, DIRIGIDO POR A. I. CAMACHO, MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES, PÁGS. 453-478, MADRID, 1962. (*tabla*); DANTÉ FENOLIO (*dipluro*)/*AMERICAN SCIENTIST*

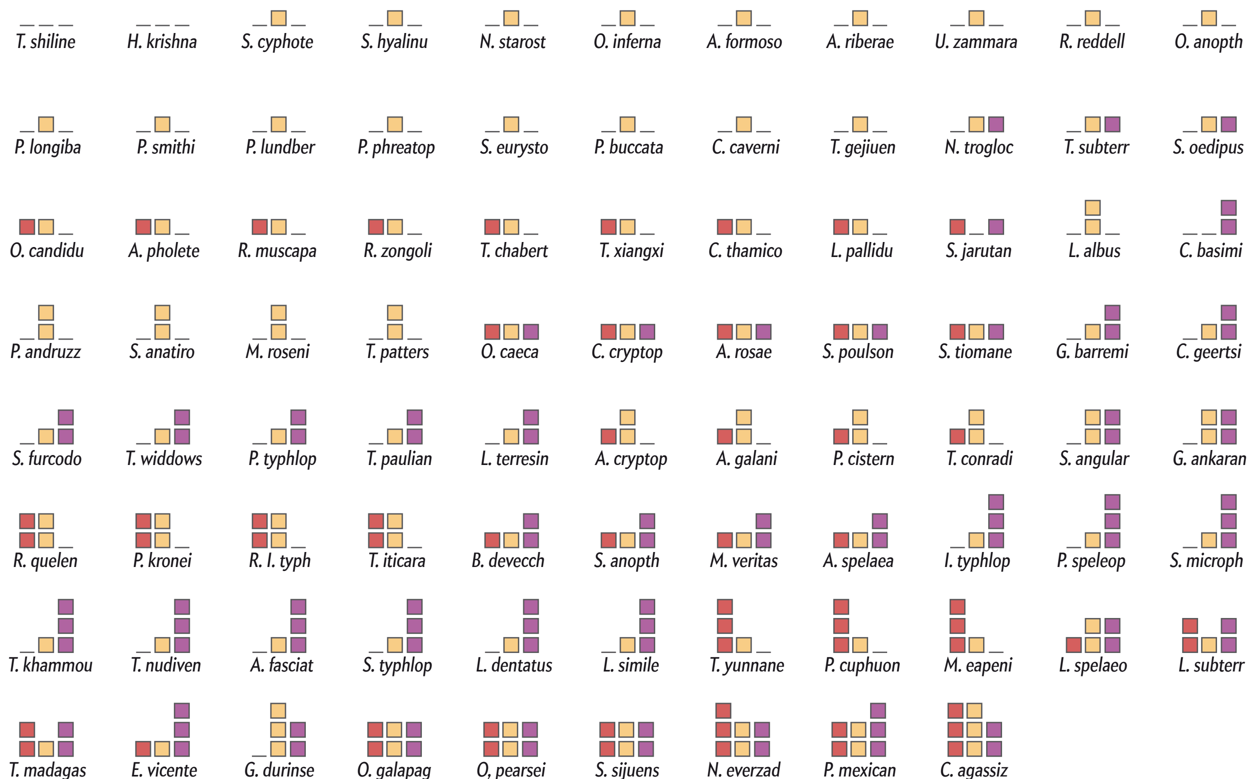
Mi equipo analizó la hipótesis de la preadaptación en los peces troglomórficos. En una revisión bibliográfica, descubrimos que se mencionaban tres características como «preadaptaciones» para el ambiente hipogeo: órganos sensoriales hiperdesarrollados, metabolismo bajo y hábitos nocturnos. Un organismo podía presentar uno o dos de los rasgos, o los tres a la vez. Agrupamos las 86 especies troglomórficas conocidas por entonces en sus 18 familias respectivas y buscamos en ellas algunos de esos caracteres «preadaptativos». De las 18 familias de peces con representantes troglomórficos, solo 10 exhibían alguno de los rasgos «preadaptativos». Llegamos a la conclusión de que las supuestas preadaptaciones al ambiente hipogeo no eran ne-

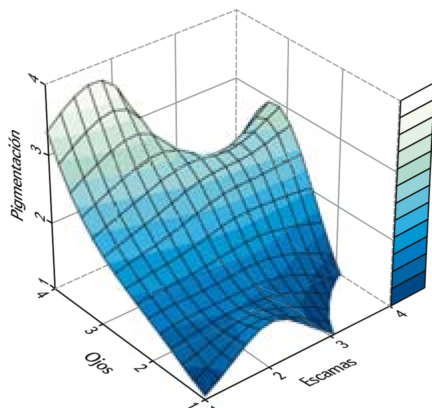
DIVERSIDAD

Manifestación irregular de los rasgos

Los troglomorfismos, los rasgos adaptados a la vida subterránea, como la ceguera y la despigmentación, exhiben una enorme variabilidad entre especies. En una muestra de 86 especies de peces troglomorfos, se observó que solo siete de ellas mostraban el mismo grado de troglomorfismo para cada uno de los caracteres analizados (ojos, pigmentación y escamas). Una simple ojeada a la gráfica revela tendencias adaptativas muy irregulares, lo que indica que las generalizaciones acerca de la evolución de los troglomorfos son poco fiables. Mientras en una especie la presión de selección comparada sobre dos caracteres fue débil y fuerte, respectivamente, en otra fue fuerte y débil.







Cuando los caracteres de las 86 especies estudiadas se combinan en un paisaje fenotípico, los resultados indican una mezcla diversa de grados de desarrollo. Se descarta, por tanto, la idea de que las fuerzas que impulsan el desarrollo de los troglomorfismos guarden cierta relación mutua. La irregularidad de la gráfica responde a la ausencia de paralelismo en los cambios. Para explicar tal mosaico de morfologías, sin duda hemos de tener en cuenta la historia evolutiva de las especies y el entorno peculiar en el que viven.

DE: «IT'S A WONDERFUL HYPOGEAN LIFE: A GUIDE TO THE TROGLOMORPHIC FISHES OF THE WORLD», POR A. ROMERO Y K. M. PAULSON EN *ENVIRONMENTAL BIOLOGY OF FISHES*, VOL. 62, PÁGS. 13-41, 2001 (*nombres de especies*); BARBARA AULICINO Y ALDEMARO ROMERO (*gráfica*)/*AMERICAN SCIENTIST*

cesarias ni suficientes para que una especie colonizara con éxito un hábitat hipogeo.

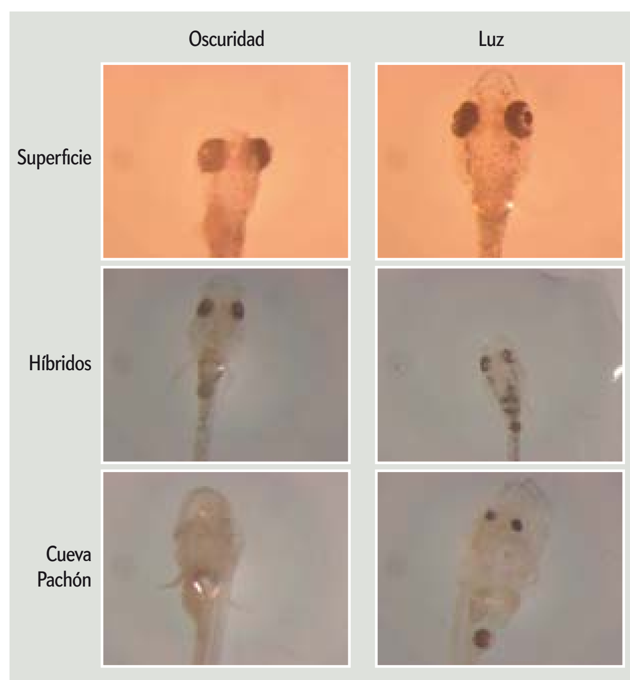
Las características de algunas especies hacen pensar en contra de la hipótesis de la «preadaptación». El tetra cavernícola mexicano, uno de los organismos de cuevas más estudiados, puede encontrarse a la vez como forma epigea (con ojos y pigmentada) e hipogea (en general, ciega y despigmentada). La forma epigea presenta una distribución amplia en las aguas continentales del Nuevo Mundo, desde Texas a Argentina. Aunque se han descrito poblaciones cavernícolas con ojos en distintas partes, la única región en la que se han desarrollado individuos ciegos y despigmentados es en México central oriental, donde existen más de 30 cuevas con poblaciones subterráneas del pez. Sin embargo, no todas las poblaciones cavernícolas de la zona muestran el mismo grado de divergencia morfológica con respecto a las formas de superficie. Algunas son totalmente ciegas y despigmentadas, mientras que otras lo son solo parcialmente. Tres cuevas albergan solo individuos con ojos completos y pigmentación. Once de las poblaciones presentan formas con ojos y ciegas, así como formas fenotípicamente intermedias. Al menos una de ellas está constituida por individuos con ojos y ciegos, pero sin formas intermedias.

Además de la ceguera y la despigmentación, los morfos troglomórficos y de superficie de esta especie difieren en otras características. Las poblaciones troglomórficas poseen un mayor número de papilas gustativas, nunca forman cardúmenes, son activas durante todo el tiempo y no son agresivas. Se han identificado diferencias entre poblaciones en la respuesta fototáctica y se ha observado que incluso algunas formas cavernícolas reaccionan ante la luz.

Las formas superficial y troglomórfica de *A. fasciatus* se entrecruzan tanto en condiciones naturales como de laboratorio. Producen híbridos fértiles con un fenotipo intermedio en la primera generación (F1). En la generación posterior al autocruzamiento (F2), los individuos varían desde una forma casi completamente ciega y despigmentada hasta una con ojos casi completos y pigmentada. Otros estudios genéticos respaldan asimismo la idea de que las formas cavernícola y epigea corresponden de hecho a la misma especie.

Este panorama biológico resulta complejo no solo en el espacio, sino también en el tiempo. Cuando la forma troglomórfica de *A. fasciatus* se describió en 1936, toda la población de la localidad consistía en un morfo muy uniforme de peces ciegos y despigmentados. Analizamos la morfología general de individuos que habían sido recopilados entre 1936 y 1942, así como los que recolectamos en 1982. Descubrimos que, en 43 años o menos, la población de La Cueva Chica se había transformado en una población morfológicamente intermedia, compuesta por individuos con cierto grado de visión y pigmentación. Llegamos a la conclusión de que este nuevo morfo se había originado por hibridación introgresiva: la transferencia de genes de una población a otra a través de cruzamientos repetidos. El proceso se inició probablemente en 1940, con la invasión del ambiente cavernícola por individuos epigeos.

A pesar de la abundante información disponible sobre la especie, no se ha formulado nunca una descripción convincente de los posibles rasgos «preadaptativos» del antepasado de *A. fasciatus*. Si la forma epigea se hallaba realmente preadaptada, ¿por qué experimentó cambios tan importantes, morfológicos, fisiológicos y de comportamiento, para convertirse en un troglomorfo?



La plasticidad fenotípica resulta evidente en el desarrollo del tejido ocular y en la pigmentación de diferentes poblaciones del tetra cavernícola *Astyanax fasciatus*. Estas se desarrollaron bajo diferentes regímenes de iluminación: 30 días de luz constante o de oscuridad total a partir del momento en que hicieron eclosión. Los ojos de la especie de superficie (*arriba*) se hallan mucho menos desarrollados cuando crecen en oscuridad; en la especie cavernícola, que normalmente carece de ojos (*abajo*), resulta evidente el desarrollo del tejido ocular en el espécimen criado bajo luz constante.

CORTESÍA DEL AUTOR/AMERICAN SCIENTIST

PERDER PARA GANAR

Se aborda ahora la cuestión más intrigante de la bioespeleología: ¿Por qué se pierden algunos caracteres fenotípicos cuando los organismos cavernícolas evolucionan?

Un fenómeno biológico apenas mencionado en la bibliografía bioespeleológica y que, en mi opinión, desempeña un papel importante en la diversidad de los morfos y en la evolución de la fauna cavernícola es la plasticidad fenotípica. Varias observaciones casuales indicaban que distintas especies de peces cavernícolas y sus antepasados epigeos respondían a la presencia o ausencia de luz durante el desarrollo de la pigmentación y el aparato visual.

Mi grupo confirmó esa idea mediante el control de las condiciones lumínicas de larvas de 24 horas de vida de *A. fasciatus*. Pertenecían a tres tipos de poblaciones: epigeas (con ojos, pigmentadas), troglomórficas (ciegas, despigmentadas) y sus híbridos. Durante 30 días, algunas larvas fueron expuestas a la luz 24 horas diarias, mientras que otras estuvieron confinadas en una oscuridad total. Los resultados demostraron que los ojos de las larvas epigeas se desarrollaban mucho menos cuando los peces se criaban en la oscuridad que cuando recibían luz. Sin embargo, los resultados más espectaculares se obtuvieron con la población cavernícola: aunque, como cabía esperar, las larvas sometidas a la oscuridad no formaron ningún tejido ocular visible, las que se criaron bajo luz constante sí lo hicieron.

Ese resultado permite suponer que numerosos animales troglomórficos evolucionaron a partir de especies epigeas gracias a la plasticidad fenotípica. Dicha conclusión concuerda con el hecho de que la ausencia de luz puede desencadenar heterocronía, es decir, cambios en el momento de desarrollo de los caracteres. Se observan ejemplos de plasticidad fenotípica en los pedomorfos (animales que no alcanzan la madurez morfológica y se reproducen como juveniles) y neotenos (animales con el crecimiento detenido). Muchos organismos cavernícolas son pedomórficos o neoténicos. La mayoría de las salamandras troglobias son pedomórficas; la mitad de las salamandras pedomórficas conocidas son troglomórficas. La neotenia está bien documentada entre los animales hipogeos, en particular los peces. Los individuos hipogeos obtienen una ventaja al convertirse en pedomorfos porque pueden reproducirse antes en su ciclo biológico. La desventaja de la menor capacidad defensiva de los individuos inmaduros se descarta porque la mayoría de los organismos cavernícolas no tienen depredadores naturales.

Esos ejemplos refuerzan asimismo la idea de que los troglomorfismos se originan por selección natural y no por el simple deterioro de un fenotipo. Sabemos que la norma de reacción (la dirección e intensidad de un cambio fenotípico en respuesta a factores ambientales) es genéticamente variable y se halla sujeta a la selección natural. Por tanto, la selección natural favorece a los individuos con una mayor capacidad de expresar rasgos específicos en las condiciones apropiadas. La plasticidad fenotípica suele ofrecer superioridad reproductora frente a un fenotipo fijado genéticamente: los fenotipos inducidos por el ambiente tienden a adaptarse mejor a las condiciones ambientales predominantes que los fijados genéticamente.

Creo que la selección natural favorece a los pedomorfos y neotenos al fijar los alelos de esos rasgos en la población cavernícola. Puesto que la mayoría de las poblaciones cavernícolas son reducidas y se hallan sometidas a presiones selectivas muy parecidas dentro de la misma cueva, el proceso evolutivo puede tardar poco.

Esa explicación se ve además respaldada por la naturaleza convergente de los caracteres troglomórficos. De hecho, podemos ver los mismos tipos de cambios inducidos por la selección entre los peces de profundidad y los peces de aguas fangosas, en los que se ha producido la reducción o pérdida de los ojos y de la pigmentación. Los patrones de evolución convergente constituyen pruebas robustas de adaptación por medio de la selección natural. El aislamiento llevará después a la especiación sobre la base de la diferenciación genética del antepasado epigeo.

HACIA UNA MAYOR COMPLEJIDAD

¿Por qué entonces la evolución de los caracteres troglomórficos no se produce en paralelo, sino que se genera una serie irregular de fenotipos? En primer lugar, porque están controlados por conjuntos de genes independientes. En segundo lugar, el grado de desarrollo de algunos de esos caracteres (como los barbillones de los peces) se halla condicionado por la historia filogenética. Por último, las presiones selectivas sobre cada uno de los caracteres pueden diferir de una cueva a otra.

¿Y qué decir de las especies no troglomórficas que viven en un ambiente hipogeo? Conocemos la abundante variación genética para la plasticidad en el seno de las poblaciones naturales, que a su vez está sujeta a selección. Asimismo, la variación genética para la plasticidad fenotípica resulta habitual: una población puede albergar variación genética para la plasticidad de un rasgo al tiempo que se muestra invariable para otro carácter relacionado con el mismo parámetro ambiental. De nuevo, ello explicaría la complejidad observada en las respuestas fenotípicas entre los organismos hipogeos. Algunos presentan un grado de ceguera elevado pero muy poca despigmentación porque los genes que controlan uno de los rasgos son muy plásticos, mientras que los que controlan el otro no lo son.

La recuperación de parte del tejido ocular y de la pigmentación en los individuos de algunas especies troglomórficas, como se ha indicado arriba, puede deberse a que la población conserva cierta capacidad de modificar el fenotipo, incluso aunque esta represente un ecotipo (una población especializada genéticamente para una condición ambiental determinada). Esta idea encaja con nuestro conocimiento de la genética de poblaciones de *A. fasciatus*, en las que hallamos fenotipos muy diversos (epigeos y troglomórficos) pero una escasa diferenciación genética. El tipo troglomórfico podría caracterizarse fácilmente como un ecotipo. Bajo condiciones ambientales extremas, un genotipo con plasticidad fenotípica daría lugar a lo que parecería un ecotipo. Puede existir una notable convergencia en la norma de reacción de las diferentes poblaciones dentro de determinados ambientes.

La plasticidad puede —y debe— mantenerse en ambientes fluctuantes, en especial cuando las variaciones ambientales son predecibles en cierta medida. Otra generalización acerca del ambiente cavernícola es la antigua creencia de que se trata de un medio constante y sin fluctuaciones ecológicas. Sin embargo, ya hace algún tiempo que esta hipótesis se ha puesto en duda. Las inundaciones, por ejemplo, son acontecimientos periódicos bastante habituales en las cuevas y representan una notable alteración de las condiciones ecológicas.

No sorprende que los organismos cavernícolas en los que se ha demostrado plasticidad fenotípica sean acuáticos: esponjas, cangrejos, peces y salamandras. Las condiciones ambientales fluctúan con frecuencia en las cuevas tropicales. Presentan variaciones constantes (pero predecibles) en el nivel del agua asociadas a cambios estacionales drásticos en la precipitación, lo que contribuye a explicar la existencia de más especies y poblaciones troglomórficas en latitudes bajas que en las regiones templadas.

Las cuevas constituyen laboratorios naturales únicos. En el pasado han inspirado numerosas ideas en el campo de la biología, y todavía nos proporcionan una excelente oportunidad para confirmar y expandir nuestro conocimiento sobre la evolución de la vida sobre la Tierra. A medida que exploremos más cuevas tropicales y subtropicales, sin duda la creatividad y el oportunismo de la evolución nos sorprenderán cada vez más y nos plantearán nuevos retos.

PARA SABER MÁS

Introgressive hybridization in a population of *Astyanax fasciatus* (Pisces: Characidae) at La Cueva Chica. A. Romero en *National Speleological Society Bulletin*, vol. 45, págs. 81-85, 1983.
Cavefish as a model system in evolutionary developmental biology. W. R. Jeffrey en *Developmental Biology*, vol. 231, págs. 1-12, 2001.
Replacement of the troglomorphic population of *Rhamdia quelen* (Pisces: Pimelodidae) by an epigean population of the same species in the Cumaca Cave, Trinidad, W. I. A. Romero et al. en *Copeia*, vol. 2002, págs. 938-942, 2002.
Encyclopedia of cave and karst science. Dirigido por J. Gunn. Fitzroy Dearborn; Londres, 2004.
The end of regressive evolution: Examining and interpreting the evidence from cave fishes. A. Romero y S. M. Green en *Journal of Fish Biology*, vol. 67, págs. 3-32, 2005.
Cave biology: Life in darkness. A. Romero. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
El origen de la vida, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, El tiempo, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Felicidad y trabajo

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo
T-52: El origen de la vida
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 7,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos

España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA

España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

por Francisco Gutiérrez

El karst en evaporitas

Los procesos de disolución en este tipo de rocas, muy solubles, conllevan un elevado riesgo de formación de dolinas

▲ **La Salada de Mediana,** en el sector central de la depresión del Ebro, es una dolina de grandes dimensiones que alberga un lago salino efímero.

Los sedimentos evaporíticos se forman fundamentalmente en lagos y medios marinos. Se originan a partir de salmueras, que al evaporarse dan lugar a la precipitación de sales. Estas rocas poseen un comportamiento singular debido a su elevada solubilidad. Un litro de agua destilada llega a disolver hasta 2,4 g de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_20$) y 360 g de halita (NaCl), los minerales principales de las rocas evaporíticas. La geomorfología y la hidrología de los terrenos evaporíticos se hallan en gran medida condicionadas por la actuación de procesos de disolución. Aparecen así las zonas kársticas, con el desarrollo de formas específicas de relieve originadas por la disolución superficial y subterránea. Los paisajes kársticos se caracterizan por la presencia de lapiaces (conjunto de surcos y canales separados por aristas cortantes que se forman en la superficie de las rocas), depresiones cerradas, sistemas de cavidades, manantiales salinos y un drenaje predominantemente subterráneo.

El hundimiento de las cavidades se manifiesta en superficie mediante la formación de dolinas de subsidencia (depresiones cerradas de diversas formas), las cuales pueden causar daños irreversibles en todo tipo de estructuras humanas (edificios, infraestructuras lineales, etcétera). A diferencia de los terrenos calcáreos, en las zonas evaporíticas los procesos de karstificación suelen actuar con gran rapidez, lo que explica la mayor probabilidad de ocurrencia de dolinas en ellas. Por otra parte, tanto las dolinas como las cavidades subterráneas constituyen obstáculos difíciles de salvar a la hora de construir embalses. En España, los afloramientos de formaciones evaporíticas ocupan aproximadamente un 7 por ciento de la superficie. Representa el país europeo donde el riesgo de subsidencia por la disolución de estos materiales conlleva un mayor impacto económico. En un futuro, cabe esperar un aumento de los daños en las infraestructuras como consecuencia de la expansión de algunas urbes, como Madrid, hacia zonas con sustrato evaporítico. Tal y como se ha constatado en diversas regiones del planeta, dicha tendencia podría invertirse mediante la incorporación de investigaciones geológicas en la planificación del territorio.

◄ **Lapiaz** desarrollado en estratos de halita (roca de cloruro de sodio, *rosa*) con intercalaciones de margas (roca de arcilla y carbonato cálcico, *gris*), en el diapiro salino de Cardona (Barcelona).

FRANCISCO GUTIÉRREZ



▶ **Dolinas de colapso** en un afloramiento de sales y yesos en el valle del río Karun (montañas Zagros, Irán). Gran parte del agua de lluvia se infiltra y drena subterráneamente, a través de una red dendrítica de cavidades, hacia manantiales salinos.



▶ **Alineación de dolinas recientes** en la costa del mar Muerto. El rápido descenso (un metro al año) que ha experimentado el nivel de este lago salado en las últimas décadas ha provocado la circulación de flujos de agua dulce a través de depósitos de sal, lo que está ocasionando la formación de numerosas cavidades y hundimientos.



▶ **En junio de 2006,** se produjo el hundimiento de una cavidad generada por la karstificación del sustrato evaporítico junto a la vía de servicio de la autovía A-68, cerca de Zaragoza.

por Anna Estany



Anna Estany es catedrática de filosofía de la ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona.

¿Es posible una filosofía de la química?

El año internacional de la química nos brinda una excelente oportunidad para remediar el tradicional olvido filosófico de esta ciencia

Es opinión prácticamente unánime que la química ha sido la gran olvidada por parte de la filosofía de la ciencia. Diversos trabajos en las últimas décadas se han preguntado por las razones de tal omisión. El objetivo de este artículo es doble: por un lado, analizar las principales razones de esta falta de interés por la química; por otro, proponer una serie de retos a los que la filosofía de la química debe enfrentarse en el siglo XXI.

La filosofía de la química ha tenido un desarrollo inferior a otras ramas de la filosofía de la ciencia. Solo hay que revisar las revistas, actas de congresos y libros para darse cuenta de que la filosofía de la química no tiene el mismo anclaje institucional que la filosofía de la física, de la biología, de la psicología o de las ciencias sociales. Ello contrasta con el notable desarrollo de la historia de la química, que incluso ha sido utilizada por algunos filósofos como fuente de casos de estudio. Así ocurre con Thomas Kuhn, quien concede un lugar importante a la revolución química en su obra *La estructura de las revoluciones científicas* (1962). Contrasta también con el avance de la propia investigación química, que no desmerece en nada respecto de la producción de otras disciplinas. ¿Por qué, entonces, la filosofía de la química no se ha desarrollado en la misma medida en que lo han hecho la química propiamente dicha y su historia?

Entre las razones de ese olvido distinguimos las que se refieren a cuestiones epistemológicas, ontológicas y metodológicas, de las relacionadas con la química aplicada. En el primer grupo se incluiría el hecho de que la filosofía de la ciencia se desarrolló, entre los años treinta y sesenta del siglo pasado, bajo el predominio del empirismo lógico, con atención preferente a la ciencia teórica. Ahora bien, en general, los químicos han estado más centrados en el aspecto experimental de la ciencia, el cual, para el empirismo lógico, quedaba subordinado a la teoría. No obstante, incluso cuando las tradiciones experimentales cobraron una influencia filosófica notable, como en el caso de Ian Hacking, de la Universidad de Toronto, quien defiende que la experimentación no ha de ser subsidiaria de la teoría, la filosofía de la química no experimentó el salto cualitativo que cabría esperar.



En este primer grupo de causas se hallaría también la influencia del esquema de explicación nomológico-deductivo de Carl Hempel y Paul Oppenheim. Según este, un hecho queda explicado si puede ser deducido a partir de una ley más ciertas condiciones iniciales. Esta teoría de la explicación no encajaba bien con algunos ejemplos tomados de la química.

Otra razón que ha pesado en el desinterés de los filósofos por la química tiene que ver con el reduccionismo. Tras el éxito de la mecánica cuántica se llegó a la conclusión de que la química podía ser reducida a la física. Incluso los denominados «químicos cuánticos» partían de esta idea. Quedaba así cuestionada la autonomía de la química y con ello su posible interés filosófico. Sin embargo, frente a los químicos partidarios del reduccionismo, como H. Eyring, J. Walter y G. E. Kimball, tenemos otros especialistas, como G. K. Vemulapalli y H. Byerly, ambos de la Universidad de Arizona, que consideran que hay que distinguir el reduccionismo epistemológico del ontológico y que basta con refutar el primero para asegurar la autonomía de la química. Incluso algunos filósofos, como Olimpia Lom-

bardi, de la Universidad de Buenos Aires, y Martín Labarca, de la Universidad Nacional de Quilmes, van más allá al refutar también el reduccionismo ontológico y defender el pluralismo ontológico en química.

Pero, pueda o no reducirse la química a la física, no parece que esta cuestión sea la única causa del olvido. Hay otras disciplinas en las que el debate sobre el reduccionismo ha sido muy importante y, no obstante, han recibido más atención filosófica. Se ha discutido sobre la posible reducción de la psicología a la neurociencia, o de la sociología a la psicología, pero ni la filosofía de la psicología ni la filosofía de las ciencias sociales han quedado por ello marginadas.

Otra posible razón para el olvido de la química se busca en el hecho de que la filosofía de la ciencia se institucionalizó a través del Círculo de Viena, cuyos miembros se interesaban sobre todo por la física. Sin embargo, de nuevo encontramos contraejemplos. Hay otras disciplinas que en un primer momento también quedaron ocultas por el fisicalismo, como la psicología y la biología, pero ello no ha sido óbice para que hayan despertado posteriormente el interés de los filósofos.

El caso de la química nos pone, pues, ante una situación paradójica. La química forma parte de muchos de los campos interdisciplinares surgidos en las últimas décadas, como la bioquímica, y desempeña un papel clave en el desarrollo de disciplinas como la geología y la arqueología. No obstante, parece que la visibilidad, tanto a nivel teórico como institucional, queda siempre reservada para *la otra* ciencia asociada.

Pasemos ahora a las causas relativas al carácter aplicado de la química. En los últimos tiempos esta ciencia se ha asociado a la industria. Esto le ha dado mala imagen, porque se ha relacionado con realidades negativas (contaminación, plaguicidas). Sin embargo, la física ha proporcionado la base teórica de la bomba atómica y de las centrales nucleares, sin que ello afecte negativamente a la filosofía de la física.

Al final no podemos más que preguntarnos qué especificidad tiene la química para que haya estado tan alejada de los filósofos de la ciencia. Creo que hay dos hechos clave. El primero tiene como centro la mecánica cuántica. Su desarrollo tuvo una papel muy importante en la pérdida de identidad de la química como ciencia descriptiva. En tanto la física daba un salto descomunal en la descripción ontológica del mundo, la química tardó en reaccionar. Deberían transcurrir algunos decenios hasta que, a partir de los años ochenta, ciertos filósofos empezaron a pensar que el fisicalismo y el reduccionismo no constituían la única alternativa para la química. Jaap Van Brakel, de la Universidad Católica de Lovaina, fijó en 1994 el nacimiento de la filosofía de la química, a nivel institucional, con la celebración en Londres de la Primera Conferencia Internacional sobre Filosofía de la Química.

Tras el éxito de la mecánica cuántica se llegó a la conclusión de que la química podía reducirse a la física

En segundo lugar, mientras la química daba pasos de gigante en las aplicaciones industriales, la filosofía de la ciencia se centraba en las «ciencias puras». No es que la física o la biología no tuvieran aplicaciones, sino que los filósofos de la ciencia no reflexionaban sobre ellas. Los modelos de ciencia, desde Hempel hasta Van Fraseen, de la Universidad de Princeton, estaban pensados para proporcionar la estructura lógica, epistemológica, ontológica y metodológica de las ciencias puras. Tampoco estaban en la agenda de los filósofos de la ciencia las ingenierías, ni la medicina, ni las ciencias de la educación o de la información. Toda esta problemática era abordada por la filosofía de la tecnología y, más adelante, por los estudios de «ciencia, tecnología y sociedad».

Desde la filosofía de la ciencia, uno de los pocos expertos que abordaron esos temas fue Ilka Niiniluoto, de la Universidad de Helsinki, quien en 1993 publicó un artículo sobre la estructura y los objetivos de la ciencia aplicada. En dicho estudio tomaba el modelo propuesto por Herbert Simon para las ciencias de lo artificial, y lo aplicaba a las «ciencias del diseño», cuyo objetivo era transformar el mundo y no describirlo. Muchas características que Simon asigna a las ciencias de lo artificial coinciden con las que han sido atribuidas a la química por importantes filósofos de la química de las últimas décadas. Van Brakel, por ejemplo, señala que la química es la ciencia de la transformación de las substancias y que se halla más próxima a la tecnología que a la física teórica.

Con todo, la filosofía de la química no puede quedar reducida a una reflexión sobre esta disciplina como productora de sustancias artificiales. Los filósofos de la química actuales no aceptarían —y están justificados para ello— que la química fuera considerada solo una ciencia aplicada. Cuestión aparte es que la presencia de la química en muchas de las ciencias del diseño haya tenido un desarrollo tan espectacular que haya ocultado su base teórica y su interesante aportación a la descripción del mundo.

Podemos señalar, pues, varios desafíos para la filosofía de la química del siglo XXI. En primer lugar, dado el desarrollo de la química teórica, se espera una consecuente reflexión filosófica, ya sin el constreñimiento del reduccionismo. Las referencias indicadas ofrecen una breve muestra de ello. En segundo término, la química aporta parte de la base teórica de ciencias del diseño como la farmacología, la medicina y las ciencias ambientales, entre otras. La reflexión filosófica debe tenerlo en cuenta. En tercer lugar, es indiscutible que la filosofía de la ciencia experimental ha de constituirse en marco para la filosofía de la química, ya que puede aportar casos de estudio, históricos y actuales, en los cuales los experimentos desempeñan una función relevante. Un cuarto reto consiste en incrementar la visibilidad de la química en aquellos campos disciplinares de los que forma parte. Y, por último, teniendo en cuenta la importancia de la química para la industria, resulta imprescindible una reflexión ética sobre sus aplicaciones. Ello podría plasmarse en un campo filosófico denominado «quimioética», de la misma forma que ya existe la «bioética».

PARA SABER MÁS

On the neglect of the philosophy of chemistry. J. Van Brakel en *Foundations of Chemistry*, vol. 1, págs. 111-174; 1999.

The ontological autonomy of the chemical world: A response to Needham. O. Lombardi y M. Labarca en *Foundations of Chemistry*, vol. 8, n.º 1, págs. 81-92; 2006.

The philosophy of chemistry. From infancy towards maturity. J. Schummer en *Philosophy of chemistry: Synthesis of a new discipline*, dirigido por D. Baird, E. Scerri y L. MacIntyre. Boston Studies in the Philosophy of Science, vol. 242, págs. 19-39, Springer; Dordrecht, 2006.

por Daniel T. Willingham

Daniel T. Willingham es profesor de psicología en la Universidad de Virginia.



Confíe en mí, soy científico

Por qué tantos optan por no creer lo que dicen los científicos

Un amigo mío sostiene que el autismo de su hijo fue provocado por una vacuna que le pusieron de pequeño. Sigue abrazando esta opinión a pesar de una serie de estudios científicos que descartan vínculos entre el autismo y las vacunas. Cuando el artículo que apuntaba la existencia de una tal relación cayó en descrédito, por falsario, la reacción de mi amigo fue que ahora sería más difícil persuadir al público de los peligros de la vacunación. No es el único: casi la mitad de los estadounidenses creen que existe, o podría existir, un vínculo entre las vacunas y el autismo.

La paradoja no termina ahí. Mi amigo insiste en que confía en los científicos. De nuevo, como la mayoría. En una encuesta patrocinada por la Fundación Nacional de Ciencia, hubo más participantes que expresaron «gran confianza» en los científicos que en dirigentes de cualesquiera otras instituciones, excepto los militares. Los estadounidenses consideran que los científicos son más expertos e imparciales que los líderes de otros sectores sociales, económicos o gubernativos. ¿Por qué, pues, se confía en los científicos en asuntos de carácter general, pero no en ciertas cuestiones concretas?

Son muchos quienes culpan de ello a la deficiente calidad de la enseñanza de las ciencias en EE.UU. Su razonamiento reza así: si en las escuelas se dedicase más atención a las ciencias, los jóvenes aprenderían a valorar debidamente la opinión científica en cuestiones como las vacunas, el clima, la evolución y otros asuntos de trascendencia política. Pero este argumento está desencaminado. Quienes cuentan con mayores conocimientos científicos apenas manifiestan una confianza algo mayor en los científicos. Los saberes subyacentes a numerosas cuestiones que requieren acción política son sumamente especializados y su evaluación exige hondos conocimientos, mucho más allá de los que puedan ofrecerse en los cursos de secundaria o de bachillerato. Un ataque más directo podría consistir en educar a la población para que comprendiera por qué se inclina a aceptar ideas imprecisas.

Según parece, lo que más valoramos es la exactitud. Queremos que nuestras creencias sean acertadas —acordes con la verdad— y sabemos que la ciencia es guía fiable hacia la exactitud. Pero este deseo de precisión entra en conflicto con otros motivos, algunos inconscientes. Damos cobijo, por ejemplo, a creencias que consideramos importantes para proteger ciertos valores. Quienes consideran que la Naturaleza es sacrosanta pueden percibir que la modificación genética es moralmente inaceptable, con independencia de cuáles sean su seguridad o utilidad. Conservamos también creencias que se arraigan en nuestras emociones. Una pandemia de gripe que cause gran mortandad entre inocentes puede suscitar sentimientos de temor e indefensión. Una forma de evitar la angustia ante tales emociones consiste en despreciar, por improbables, los avisos sobre pandemias.

Los humanos, en el esfuerzo por conciliar las motivaciones racionales de nuestras creencias con las puramente irracionales, nos hemos vuelto diestros en el autoengaño. Queriendo vernos como seres racionales, hallamos razones para mantener que nuestras convicciones son verdaderamente acertadas. Para convencernos de que la ciencia es «controvertida» o «inestable» pueden bastar un par de opiniones contrarias. Si la gente supiera que la veracidad de sus convicciones es cuestionable por otros motivos, probablemente la mayoría se pondría en guardia.

Pedirles a los profesores de ciencias que impartan contenidos suficientes para comprender todos los problemas tal vez no sea realista, pero los docentes sí podrían mejorar la capacidad del estudiante para apreciar en qué consiste la veracidad del conocimiento científico. Mediante el estudio de la historia de la ciencia, los jóvenes podrían comprender mejor qué razones tienen para defender sus convicciones y el valor de la ciencia como vía hacia el saber. Si llegasen a entender el modo en que la cosmología medieval habría hecho



JEFFREY DECOSTER

que la teoría geocéntrica del sistema solar pareciera correcta, les sería más fácil ver influencias similares en ellos.

La historia de la ciencia puede contribuir, asimismo, a que los estudiantes comprendan por qué el conocimiento científico, al crecer, se va haciendo cada vez más exacto. Es fácil para los no científicos rechazar las conclusiones que no sean de su gusto, tachándolas sin más de «controvertidas», porque los científicos cambian a menudo de parecer. Pero al estudiar cómo observaciones nuevas provocaron la revisión de teorías importantes, los estudiantes verán claramente que la ciencia no consiste en leyes inmutables, sino en explicaciones provisionales, que es necesario revisar cuando se dispone de otras mejores. Apreciarán también que la presteza con que los científicos están dispuestos a revisar sus creencias para que se ajusten a los datos es fuente de gran vigor, no de debilidad, y entenderán por qué es tan notable la casi unanimidad del mundo científico en cuestiones como el calentamiento global o la seguridad de las vacunas. Puede que la ciencia no sea la única forma de organizar y comprender nuestra experiencia, pero en cuanto a acierto, deja en la cuneta a la religión, la política o el arte. Esa es la lección.

por Pere Castells

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.



El alioli llega a Harvard

El estudio científico de las emulsiones permite avanzar en la cocina

Hace ya casi un año tuvo lugar el curso «Science & cooking: from *haute cuisine* to the science of soft matter», organizado conjuntamente por la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (SEAS), de la Universidad de Harvard, y la Fundación Alicia. David A. Weitz y Michael P. Brenner, ambos de la SEAS, impartieron una de las clases con el cocinero Nando Jubany acerca de la teoría de las emulsiones y los secretos de su aplicación en la cocina.

Las emulsiones corresponden a suspensiones coloidales entre dos líquidos no miscibles. Las gotas de un líquido (fase dispersa) quedan contenidas y rodeadas en otro (fase continua), con el que no pueden mezclarse. Para lograr que estas mezclas permanezcan estables se necesita la presencia de otro elemento: el emulsionante.

La leche y la nata constituyen emulsiones estabilizadas de proteínas y glóbulos de grasa en un líquido. Esto es posible gracias a los fosfolípidos, unas moléculas emulsionantes que se hallan en la membrana de los glóbulos de grasa. Estas moléculas poseen una parte hidrófila y otra lipófila, por lo que tienen la capacidad de estabilizar líquidos acuosos con grasas. En la cocina, los emulsionantes más utilizados son fosfolípidos, muy abundantes en la yema de huevo, y proteínas, en el huevo y la leche o nata (caseína).

El tradicional alioli corresponde a una emulsión compuesta de ajo, aceite y sal. Con la ayuda de un mortero se obtiene una emulsión en la que hay muchas gotitas de aceite juntas; en la interfase, el ajo hace de emulsionante, a la vez que aporta la fase acuosa. Según la receta de Jubany, se machacan en un mortero diez dientes de ajo y una pizca de sal, con el fin de extraer el agua del ajo; a la pasta obtenida se le añade poco a poco un litro de aceite. Un truco: para compensar el déficit acuoso de la preparación, se recomienda ir añadiendo gotitas de agua tibia. Si se ponen pocos ajos, al dejar de agitar, las pequeñas gotitas de aceite pueden unirse dejando más fluido o incluso cortado el alioli. Si añadimos yemas a la emulsión, esta será más estable y podremos reducir a uno o dos dientes de ajo la preparación por litro de aceite.

Para obtener mayonesa, en cambio, partiremos del huevo entero; así, el déficit acuoso queda cubierto por la clara. También podemos añadir zumo de limón, sal, ajo u otros componentes aromáticos. Otra novedad es la utilización de la batidora eléctrica. El procedimiento consiste en introducir el túrmix en la mezcla inicial, agitando y parando para, luego, ir añadiendo el aceite, mientras se sube y baja el triturador. La agitación provoca que cada vez haya gotitas más pequeñas de aceite rodeadas de una capa de agua más fina, lo que reduce la probabilidad de que estas se fusionen y corten la salsa. A mayor agitación, menor es el tamaño de las gotitas de aceite y, por tanto, más estable la emulsión y mayor el área superficial por donde pueden escapar las moléculas aromáticas y llegar a nuestra nariz. Sabremos que la emulsión es estable por su textura espesa, prácticamente sólida, y su color claro. Las gotitas de la fase dispersa desvían los rayos de luz de su trayectoria a través del líquido continuo y presentan una tonalidad blanquecina, típica de las emulsiones.



Alioli de cinco kilogramos.

NANDO JUBANY

Según el método que empleemos para preparar la mayonesa (mortero, varillas o batidora eléctrica) obtendremos una textura u otra, puesto que la agitación del aceite varía de un utensilio a otro.

También influye en la textura la relación de cantidad entre las fases. Cuando añadimos demasiado aceite a una mayonesa, esta tiende a cortarse por falta de fase acuosa, aunque haya suficiente emulsionante. Otro ejemplo corresponde a la lactonesa, cuyo emulsionante es la caseína de la leche y donde las proporciones entre leche y aceite deben ser precisas para evitar que se corte. La propuesta culinaria es de 3 volúmenes de aceite por cada volumen de leche. Traducido a masa y para 1 kilogramo de salsa, necesitaríamos 300 gramos de leche (entera, semi o desnatada), 700 gramos de aceite, sal, limón, cebollino, wasabi... En este caso, los ingredientes pueden ponerse todos a la vez en el recipiente, introducir hasta el fondo el brazo triturador y agitar y parar al principio, para que poco a poco la leche se vaya emulsionando con el aceite; luego, se sube el brazo para obtener la emulsión final.

Otro factor que debe tenerse en cuenta es la viscosidad de la fase acuosa. Un líquido más viscoso será menos fluido, de forma que las pequeñas gotas de agua no se juntarán tan rápido y tendremos una emulsión más estable. En la salsa holandesa, al calentar las yemas, sus proteínas se desnaturalizan, atrapan el agua y espesan la salsa; se agrega luego el aceite para formar la emulsión. La receta propuesta en Harvard se basa en poner en un bol al baño maría dos yemas, sal y zumo de limón. Se va homogeneizando; cuando la mezcla se halla a 50 ºC, se añaden lentamente 500 gramos de mantequilla derretida a la misma temperatura.

Un ejemplo claro de la aportación de la ciencia a la gastronomía es la utilización de un espesante de última generación, la goma xantana. Se trata de un polisacárido que produce soluciones acuosas muy viscosas y, por tanto, estabilizadoras. Se aplica a las vinagretas.

Una vez más, la relación entre la ciencia y la cocina permite explicar procesos culinarios cotidianos, perfeccionarlos y crear nuevas elaboraciones.

INFORMÁTICA

SEGURIDAD DE LA RED ELÉCTRICA

Los virus informáticos han desbaratado sistemas de control industrial muy avanzados. La red eléctrica podría ser el siguiente objetivo

David M. Nicol

EN SÍNTESIS

Todos los aspectos de la red eléctrica se hallan controlados por ordenador. Se trata del mayor ejemplo de una infraestructura civil entrelazada con la informática.

El virus Stuxnet, que infectó las plantas del programa nuclear de Irán, demostró que también la maquinaria es vulnerable ante un virus informático bien diseñado.

La red eléctrica comparte muchos de los puntos débiles que Stuxnet puso de manifiesto; su gran tamaño la convierte, si cabe, en un objetivo aún más vulnerable.

Un ataque bien preparado podría dejar sin suministro eléctrico a todo un país durante días o semanas. Una serie de propuestas recientes intentan atajar el problema.



VINCENT LAFORET, REDUX PICTURES

Hace un año se hizo público que un virus informático llamado Stuxnet había logrado acceder a las instalaciones nucleares iraníes. Dado que apuntaba a un objetivo muy especial, inaccesible a través de Internet, Stuxnet fue introducido en una memoria USB. Esta acabó en manos de un técnico desprevenido que la conectó al ordenador de un centro de seguridad. Una vez allí, el virus se diseminó en silencio durante meses. Buscaba un ordenador conectado a un dispositivo mecánico bastante prosaico: un controlador lógico programable, la clase de dispositivos electrónicos que se emplean de manera rutinaria en la industria para automatizar el funcionamiento de válvulas, engranajes, motores y conmutadores. Una vez identificada su presa, Stuxnet se introdujo subrepticiamente en ella y se hizo con el mando.

Los controladores lógicos afectados pertenecían a las centrifugadoras del proyecto nuclear iraní. Se necesitan miles de esas máquinas para depurar el uranio mineral y enriquecerlo en el alto grado necesario para fabricar armamento nuclear. En condiciones normales, las centrifugadoras giran a tal velocidad que su borde exterior casi alcanza la velocidad del sonido (unos 1240 kilómetros por hora). Stuxnet elevó su velocidad hasta rozar los 1600 kilómetros por hora, más allá del punto a partir del cual el rotor contaba con una alta probabilidad de saltar en pedazos, según un informe emitido en diciembre de 2010 por el Instituto para la Ciencia y la Seguridad Internacional. Al mismo tiempo, Stuxnet enviaba a los sistemas de control señales falsas que indicaban un funcionamiento correcto. Pese a desconocer el alcance del daño infligido al programa nuclear de Irán, el mismo informe señala que, entre finales de 2009 y principios de 2010, el país habría tenido que reemplazar cerca de 1000 centrifugadoras de la planta de enriquecimiento de Natanz.

Stuxnet demostró la vulnerabilidad de la maquinaria industrial frente a los ataques electrónicos. El virus iba dirigido a un equipo en principio seguro; lo destruyó y eludió la detección durante meses. Semejante acción ofrece un ejemplo descorazonador de los ataques que podrían sufrir las instalaciones civiles en cualquier lugar del mundo si un país o un grupo terrorista dispusiese de la tecnología necesaria.

Por desgracia, la red eléctrica se muestra más vulnerable que cualquier planta de enriquecimiento nuclear. Podemos imaginar la red como un circuito gigantesco, pero en realidad se compone de miles de unidades separadas cientos de kilómetros que han de operar en estrecha coordinación. La energía que transporta debe aumentar y disminuir al compás de la demanda. Los generadores han de funcionar en perfecta sincronía con la frecuencia de la red: 50 ciclos por segundo (en la mayor parte del mundo) o 60 (en Norteamérica y Brasil, entre otros). Y aunque el fallo en un solo elemento de la red repercutiría poco en un

entramado tan vasto, un ataque cibernético coordinado contra diferentes puntos podría ocasionar daños que comprometerían durante semanas, si no meses, la capacidad para generar y distribuir energía de un país.

Dadas las dimensiones y la complejidad de la red eléctrica, coordinar un ataque semejante requeriría tiempo y un gran esfuerzo. Stuxnet fue probablemente el virus informático más avanzado de su época. Se especuló con que fuese obra del servicio secreto israelí, del estadounidense, o de ambos. Hoy, su código se obtiene en Internet. Ello eleva el riesgo de que un grupo criminal lo adapte según sus intereses a fin de atacar un nuevo objetivo.

ALLANAMIENTO DE MORADA

Hace un año participé en un simulacro de ataque informático contra la red eléctrica. En el encuentro tomaron parte representantes de empresas, del Gobierno y del Ejército estadounidenses. (Las bases militares de EE.UU. dependen de la red de suministro civil, un hecho que no es ajeno a las preocupaciones del Pentágono.) En la prueba, agentes en el papel de espías informáticos se infiltraban en varias subestaciones de transmisión y, desde allí, inutilizaban los dispositivos encargados de mantener constante el voltaje a lo largo de toda la línea de alta tensión. Al final del ejercicio, media docena de instrumentos habían quedado averiados, lo que dejaba a oscuras a todo un estado durante varias semanas.

Los ordenadores controlan todos los dispositivos mecánicos de una red eléctrica, desde los generadores —ya sean de combustibles fósiles o de uranio— hasta el tendido eléctrico de las calles. La mayoría utiliza sistemas operativos comunes, como Windows o Linux, por lo que resultan tan vulnerables a los ataques informáticos como cualquier ordenador de sobremesa. El éxito de los códigos como Stuxnet obedece a tres razones principales: dichos sistemas operativos confían de manera implícita en la legitimidad de los programas que se están ejecutando; a menudo, presentan defectos que permiten la infiltración de un programa malicioso; por último, numerosas configuraciones



David M. Nicol es director del Instituto para la Información Fiable y profesor del departamento de ingeniería eléctrica e informática de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Ha trabajado como consultor para el Departamento de Seguridad Nacional y el Departamento de Energía de EE.UU.

industriales no permiten la instalación de algunos sistemas de protección habituales.

Aun consciente de todo lo anterior, un experto en sistemas de control hubiera descartado hasta hace poco la posibilidad de un ataque informático sobre los controladores críticos de la red por la simple razón de que estos no se encuentran conectados a Internet. Pero Stuxnet demostró que tales redes de control, aun sin conexión permanente a ningún otro sistema, también son vulnerables: cualquiera puede insertar una memoria USB infectada. Ninguna puerta trasera es demasiado pequeña para un ladrón con los recursos suficientes.

Consideremos el caso de una subestación de transmisión (un punto intermedio en el transporte de electricidad desde la central hasta el domicilio). Allí se recibe la corriente de alta tensión procedente de una o varias plantas, se reduce el voltaje y la potencia se reparte entre varias líneas de salida para su distribución local. A fin de proteger las líneas, estas cuentan con disyuntores que, en caso de avería, interrumpen la corriente. Cuando un disyuntor salta, toda la energía que hubiera transportado esa línea se reparte entre las restantes. No resulta difícil aventurar que, si todas las líneas se encuentran al borde de la saturación y sobreviene un ataque que inhabilite la mitad de ellas, las que permanezcan activas sufrirán una sobrecarga.

Los disyuntores siempre han contado con módems telefónicos para permitir el acceso a los técnicos. Los números correspondientes pueden encontrarse con facilidad: hace ya treinta años que los piratas informáticos concibieron programas que llamaban a todos los números de una centralita y registraban aquellos asociados a un módem. Los asignados a un disyuntor suelen responder con un mensaje característico que revela su

MARK DUNCAN, *AP PHOTO (izquierda)*; MARK PETERSON, REDUX PICTURES *(centro)*; EBRAHIM NOROUZI, AP PHOTO *(derecha)*

ANTECEDENTES

Ataques digitales, daños materiales

A medida que la maquinaria industrial se ha ido conectando a Internet, los estragos que podría causar un ataque informático no han dejado de aumentar. A lo largo del último decenio ha quedado patente que cualquier dispositivo con un microchip representa un objetivo potencial.



Planta nuclear de Davis-Besse

Abril de 2000
Un antiguo empleado de una compañía australiana de tratamiento de aguas utilizó piezas de radio robadas para enviar órdenes falsas al sistema de alcantarillado de la ciudad de Queensland. Más de 750.000 litros de aguas residuales acabaron en ríos y parques.

Enero de 2003
Tras burlar varios cortafuegos, el gusano informático Slammer infectó el centro de operaciones de la planta nuclear de Davis-Besse, en Ohio. El gusano se propagó desde el ordenador de un contratista hasta la red comercial de la empresa y, desde allí, hacia el sistema de control de operaciones. La planta no se hallaba conectada a Internet.



Marzo de 2007
Funcionarios del Gobierno estadounidense simularon un ataque informático al generador eléctrico del Laboratorio Nacional de Idaho. El vídeo del simulacro, denominado Aurora, acabó filtrándose a la CNN.

2000 2001 2002 2003 2004 2005

función. En caso de un sistema de autentificación deficiente (contraseñas fáciles o ausencia de contraseñas), un agresor podría acceder a la red de subestaciones a través de un módem y, desde allí, modificar la configuración para que la red ignore una situación de riesgo que, en circunstancias normales, habría activado los disyuntores.

Los sistemas modernos no resultan necesariamente más seguros que los módems. Cada vez es más habitual que los dispositivos de una subestación se hallen intercomunicados mediante sistemas de radio de baja potencia, cuyo alcance suele traspasar los límites de la subestación. Por tanto, un intruso podría acceder a la red sin más que esconderse con su ordenador en las inmediaciones. Si bien las redes inalámbricas cifradas gozan de una seguridad mayor, existen herramientas informáticas para descodificarlas. Una vez dado ese paso, el agresor puede perpetrar un tipo de ataque conocido como «intermediario» (MitM, por *man in the middle*), consistente en interceptar los mensajes entre dos dispositivos o bien engañarlos para que acepten como legítimo al ordenador del atacante. Ello le permitiría emitir mensajes de control falsos; por ejemplo, para que los disyuntores sobrecarguen las líneas o para impedir que salten en caso de emergencia.

Una vez dentro del sistema, la primera acción de un código malicioso suele ser propagarse todo lo posible. Aquí, Stuxnet volvió a servir como ejemplo de algunas de las tácticas más empleadas. Cada vez que un nuevo usuario inicia la sesión en Windows, el ordenador lee y ejecuta un archivo llamado AUTOEXEC.BAT. Este programa se emplea para tareas como localizar el controlador de la impresora, ejecutar un antivirus u otras funciones básicas. El problema reside en que Windows da por supuesto que un programa con el nombre correcto es fiable, por lo que un archivo AUTOEXEC.BAT alterado puede acabar ejecutando un código agresor.

Otras estrategias podrían aprovechar la dinámica mercantil de las compañías eléctricas. La liberalización del sector ha impuesto que varias empresas rivales compartan la explotación de la red. La energía se genera, transporta y distribuye según contratos obtenidos mediante subastas en línea. Existen mercados diferentes según la escala de tiempo considerada: en uno se comercia con la energía destinada al suministro inmediato; en otro, con la del día siguiente, etcétera. Para conseguir un contrato ventajoso, el departamento comercial de una empresa debe recibir información en tiempo real desde la división de operaciones. Y a la inversa: los operadores deben saber cuánta energía deben producir para atender los pedidos comerciales. Un espía informático que se introdujese en el departamento comercial podría, por tanto, robar nombres de usuario y contraseñas para acceder a la red de operaciones.

Otros ataques se valen de los archivos de procesos por lotes (*scripts*), pequeños programas que se emplean en gran cantidad de aplicaciones. Los ficheros PDF, por ejemplo, los utilizan de manera rutinaria para facilitar la visualización de los documentos. En fecha reciente, una empresa de seguridad informática estimó que en torno al 60 por ciento de los ataques dirigidos emplean los archivos por lotes de los ficheros PDF. La simple lectura de un archivo corrupto puede permitir al agresor acceder al sistema.

Un pirata informático también podría penetrar a partir de la página web de un proveedor de *software*: bastaría con reemplazar un manual en línea por otro infectado pero de apariencia idéntica al original. Después, un correo electrónico falso que recomendase a los técnicos de la planta descargar la nueva versión del manual haría el resto.

BUSCAR Y DESTRUIR

Una vez dentro de una red de control, un intruso puede generar comandos con efectos devastadores. En 2007, el Departamento de Seguridad Nacional estadounidense escenificó en el Laboratorio Nacional de Idaho un asalto informático denominado Aurora. En el rol de pirata informático, un investigador accedió a una red conectada a un generador de mediana potencia. Como siempre, la corriente alterna producida debe oscilar con la misma frecuencia (50 o 60 hercios) que la que circula por la red y, además, debe hallarse sincronizada a la perfección con ella. El asaltante lanzó una sucesión rápida de comandos de apertura y cierre a los disyuntores de un generador de prueba situado en el laboratorio. Ello provocó un desfase entre la corriente producida y la que circulaba por la red, lo que acabó en una pugna entre ambas. Al final, el generador perdió: un vídeo desclasificado muestra cómo la enorme máquina de acero tiembla como si un tren hubiera chocado contra el edificio y, segundos después, la estancia se llena de vapor y humo.

Cualquier sistema industrial falla cuando se le fuerza a traspasar sus límites. Un asaltante podría obligar a un generador eléctrico a producir una potencia que superase la capacidad de transmisión de las líneas. Ese excedente de energía se transforma en calor y, si la situación se prolonga durante demasiado tiempo, las líneas se comban y acaban por fundirse. Si un cable de alta tensión se deforma y entra en contacto con algún objeto —un árbol, una valla publicitaria o una vivienda—, puede provocar un cortocircuito de grandes proporciones. Existen relés de protección cuyo objetivo consiste en evitar ese tipo de daños, pero un asalto informático podría interferir en su funcionamiento. Además, un ataque que manipulase la información que llega a la sala de control podría enviar a los operadores mensajes falsos que indicasen que todo se encuentra en orden.

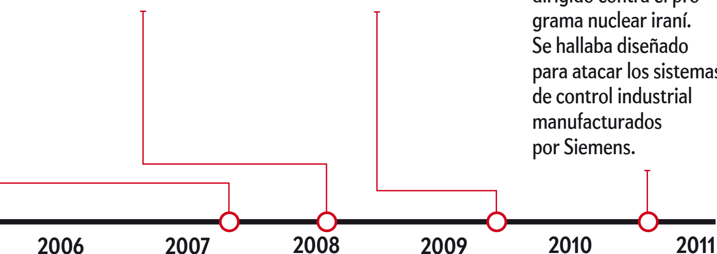
Las estaciones de control constituyen otro blanco obvio para un ataque. Allí, los operadores reciben los datos relativos al fun-

Enero de 2008
Un alto funcionario de la CIA reveló que las intrusiones informáticas en compañías eléctricas eran frecuentes en varios países y que, en algunos casos, habían llegado a la extorsión. En al menos un caso, los asaltantes lograron cortar el suministro eléctrico en varias ciudades.

Abril de 2009
El *Wall Street Journal* informó de que espías informáticos de «China, Rusia y otros países» se habían infiltrado en la red eléctrica de EE.UU. y que habían instalado programas que podrían emplearse para interrumpir el suministro.

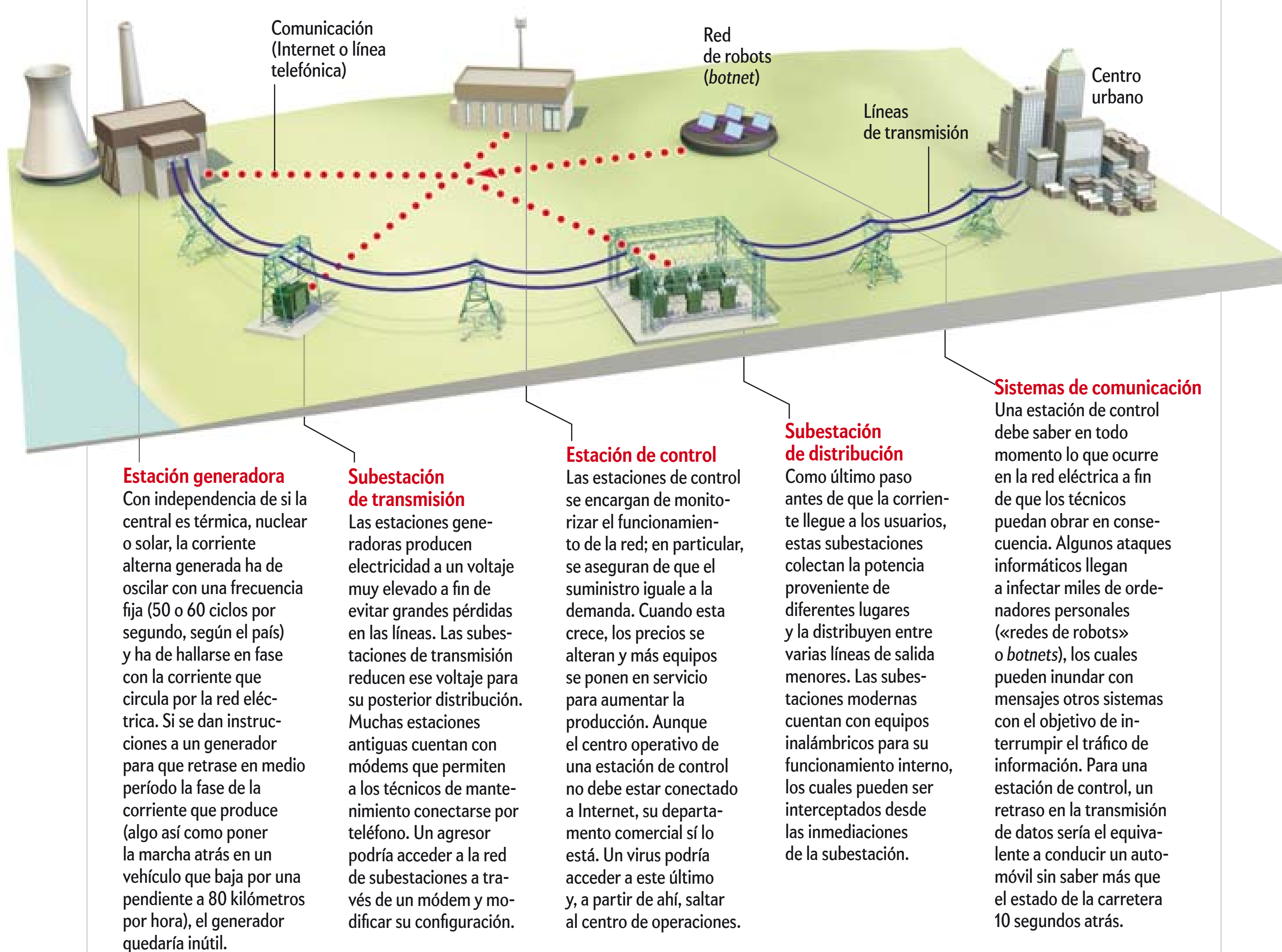


Octubre de 2010
Responsables de seguridad en Irán, Indonesia y otros lugares hicieron público el descubrimiento del virus Stuxnet, un programa dirigido contra el programa nuclear iraní. Se hallaba diseñado para atacar los sistemas de control industrial manufacturados por Siemens.



Agujeros en la red

La red eléctrica moderna requiere un equilibrio muy preciso entre la cantidad de energía generada y la que se necesita en cada momento. Docenas de elementos orquestan el flujo de la electricidad a través de cientos de kilómetros, sincronizan la corriente alterna producida con la que fluye por la red y aseguran que ningún dispositivo se vea forzado más allá de sus límites. Cualquiera de esos elementos podría sufrir un ataque informático.



Estación generadora
Con independencia de si la central es térmica, nuclear o solar, la corriente alterna generada ha de oscilar con una frecuencia fija (50 o 60 ciclos por segundo, según el país) y ha de hallarse en fase con la corriente que circula por la red eléctrica. Si se dan instrucciones a un generador para que retrase en medio período la fase de la corriente que produce (algo así como poner la marcha atrás en un vehículo que baja por una pendiente a 80 kilómetros por hora), el generador quedaría inútil.

Subestación de transmisión
Las estaciones generadoras producen electricidad a un voltaje muy elevado a fin de evitar grandes pérdidas en las líneas. Las subestaciones de transmisión reducen ese voltaje para su posterior distribución. Muchas estaciones antiguas cuentan con módems que permiten a los técnicos de mantenimiento conectarse por teléfono. Un agresor podría acceder a la red de subestaciones a través de un módem y modificar su configuración.

Estación de control
Las estaciones de control se encargan de monitorizar el funcionamiento de la red; en particular, se aseguran de que el suministro iguale a la demanda. Cuando esta crece, los precios se alteran y más equipos se ponen en servicio para aumentar la producción. Aunque el centro operativo de una estación de control no debe estar conectado a Internet, su departamento comercial sí lo está. Un virus podría acceder a este último y, a partir de ahí, saltar al centro de operaciones.

Subestación de distribución
Como último paso antes de que la corriente llegue a los usuarios, estas subestaciones colectan la potencia proveniente de diferentes lugares y la distribuyen entre varias líneas de salida menores. Las subestaciones modernas cuentan con equipos inalámbricos para su funcionamiento interno, los cuales pueden ser interceptados desde las inmediaciones de la subestación.

Sistemas de comunicación
Una estación de control debe saber en todo momento lo que ocurre en la red eléctrica a fin de que los técnicos puedan obrar en consecuencia. Algunos ataques informáticos llegan a infectar miles de ordenadores personales («redes de robots» o *botnets*), los cuales pueden inundar con mensajes otros sistemas con el objetivo de interrumpir el tráfico de información. Para una estación de control, un retraso en la transmisión de datos sería el equivalente a conducir un automóvil sin saber más que el estado de la carretera 10 segundos atrás.

GEORGE RETSECK

cionamiento de las subestaciones para, cuando proceda, enviar comandos que modifiquen su configuración. Con frecuencia, una estación de control vigila cientos de subestaciones.

La transmisión de datos entre la sala de control y las subestaciones utiliza protocolos especializados que tampoco se encuentran exentos de vulnerabilidades. Un agresor que lograse lanzar un ataque de tipo intermediario (MitM) podría insertar un mensaje propio —o corromper uno existente— a fin de provocar la caída de uno de los ordenadores de la sala de control, el de la subestación, o ambos. Otra posibilidad consistiría en inocular un mensaje con el formato adecuado pero cuyo contenido no se correspondiese con la situación real en la red; un *non sequitur* digital que la dejase inútil.

Otra opción de asalto sería provocar retrasos en los mensajes entre la estación de control y las subestaciones. En general, ha de transcurrir un pequeño intervalo de tiempo entre la medición de la corriente eléctrica en una subestación y el empleo de esos datos por parte de la sala de control para poder ajustar la potencia en cada momento. De otro modo, la situación se asemejaría a conducir un coche sin ver más que el lugar en el que nos encontrábamos diez segundos atrás. Un fallo de esta clase fue una de las razones que, en 2003, provocó un inmenso apagón que afectó a EE.UU. y Canadá.

Un gran número de ataques como los que hemos descrito no requieren una programación tan refinada como la de Stuxnet, sino que se bastarían con herramientas hoy habituales entre los

piratas informáticos. Una estrategia consiste en tomar el control de una red de miles o incluso millones de ordenadores (*botnets*, «redes de robots»). El ataque más sencillo de este tipo es el que inunda un sitio web con mensajes falsos para reducir o bloquear el flujo normal de información. Este tipo de agresiones de «denegación de servicio» podría utilizarse para enlentecer el tráfico entre la estación de control y las subestaciones.

Por otra parte, los propios ordenadores de una subestación podrían acabar formando parte de una red de robots. En cierto momento de 2009, la *botnet* del gusano Conficker había infectado diez millones de ordenadores en todo el mundo. Los individuos que la controlaban —a día de hoy, aún desconocidos— hubieran podido dar la orden de borrar el disco duro de cada una de esas máquinas. Si una red de ese tipo se instalase en los ordenadores de subestaciones eléctricas, podría forzarlos a ejecutar cualquier operación en cualquier momento. Según un estudio realizado en 2004 por la Universidad estatal de Pensilvania y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Golden, un ataque que inhabilitase unas pocas subestaciones escogidas con tino (en torno a un dos por ciento) haría caer el 60 por ciento de la red eléctrica de EE.UU. Una agresión que afectase al ocho por ciento de las subestaciones del país provocaría un apagón a escala nacional.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN

Cuando Microsoft descubre algún problema de seguridad en su sistema operativo, lanza un parche informático para que los usuarios lo descarguen, actualicen el sistema y queden protegidos frente a la amenaza. Por desgracia, el caso de la red eléctrica no se presenta tan sencillo.

Aunque los equipos y los programas empleados en el mantenimiento de la red coinciden con los que se utilizan en cualquier otro ámbito, los errores no pueden corregirse mediante la simple aplicación de parches. Los sistemas de control de la red eléctrica deben funcionar sin interrupciones, por lo que resulta inviable destinar tres horas a la semana a labores de mantenimiento. Por otra parte, las políticas de explotación de las empresas muestran cierto conservadurismo: las redes de control llevan largo tiempo instaladas, sus operadores se han familiarizado con ellas y tienden a evitar medidas que interfieran con las rutinas ordinarias.

Ante riesgos tan claros como inminentes, la Sociedad Norteamericana para la Fiabilidad Eléctrica (NERC), un consorcio que agrupa a las operadoras eléctricas estadounidenses, ha elaborado una serie de normas a fin de proteger las infraestructuras esenciales. Las compañías deben acreditar sus recursos principales y demostrar ante los auditores de la NERC que cuentan con los medios para protegerlos contra accesos no autorizados. Pero, al igual que ocurre con las auditorías contables, las de seguridad tampoco suelen ser exhaustivas. La evaluación de los detalles técnicos solo puede realizarse de manera selectiva y el visto bueno depende en gran medida del criterio del auditor.

La medida de protección más común consiste en establecer un perímetro de seguridad electrónica, una especie de «línea Maginot» cibernética. La primera defensa consiste en un cortafuegos, un dispositivo a través del cual han de pasar todos los mensajes electrónicos. Cada mensaje posee una cabecera en la que figura su origen, su destino y el protocolo de interpretación. El cortafuegos emplea esa información para dejar pasar ciertos mensajes y detener otros. Corresponde al auditor asegurarse de que los cortafuegos de una compañía eléctrica se encuentran bien configurados y que no permiten la entrada ni la salida de tráfico indeseado. Por regla general, los auditores identifican algunos de los recursos de seguridad básicos, consiguen los archivos de configuración de los cortafuegos e intentan clasificar «a mano» las artimañas que permitirían eludir esas barreras.

Pero los cortafuegos revisten gran complejidad, por lo que para un técnico resulta muy complicado analizar todas sus vulnerabilidades. No obstante, existen programas de ayuda automatizados. Nuestro grupo de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign ha desarrollado uno que ya emplean compañías eléctricas y equipos de evaluadores. El programa solo necesita los archivos de configuración del cortafuegos; tan siquiera debe conectarse a la red de ordenadores de la compañía. Gracias a él han podido identificarse varias rutas de acceso desconocidas u olvidadas que los piratas informáticos podrían haber aprovechado.

Hace poco, el Departamento de Energía de EE.UU. publicó una hoja de ruta a fin de contar con una red eléctrica más segura para 2015. (Se espera que una revisión durante este año extienda ese plazo hasta 2020.) El objetivo consiste en disponer de un sistema que reconozca las tentativas de intrusión y reaccione ante ellas de manera automática, de manera que resulte posible bloquear un virus del tipo de Stuxnet tan pronto como salte de una memoria USB. El problema reside en lograr que el sistema operativo sepa en qué programas puede confiar y en cuáles no.

Una solución pasa por aplicar la técnica criptográfica conocida como función resumen (*hash function*) unidireccional. Esta parte de un número enorme asociado a cada programa (por ejemplo, el formado por los millones de ceros y unos que lo componen) y lo convierte después en otro mucho menor que sirve a modo de signatura. Dadas las grandes dimensiones de los programas informáticos, resulta muy improbable que dos de ellos arrojen el mismo número. Una vez obtenido, antes de ejecutar un programa bastaría con comprobar si su signatura pertenece o no a una lista maestra de programas autorizados.

Se recomiendan asimismo otras medidas de seguridad, como las relacionadas con los sistemas físicos presentes en los centros de trabajo (por ejemplo, los microcircuitos incluidos en las placas de identificación de los operadores), o aquellas destinadas a aumentar el control sobre las comunicaciones entre los elementos de la red. En 2007, Aurora empleó un dispositivo fraudulento que engañó al generador y le hizo creer que estaba enviando órdenes fidedignas que, sin embargo, acabaron por destruirlo.

La implementación de todas estas medidas exigirá tiempo, dinero y esfuerzo. Pero si deseamos disponer de una red eléctrica más segura para dentro de algunos años, habremos de darnos pisa. Ojalá dispongamos del tiempo suficiente.

PARA SABER MÁS

Roadmap to secure control systems in the energy sector. Jack Eisenhauer et al. Energetics Incorporated, enero de 2006. www.oe.energy.gov/csroadmap.htm.

Security of critical control systems sparks concern. David Geer en *IEEE Computer*, vol. 39, n.º 1, págs. 20-23, enero de 2006.

Trustworthy cyber infrastructure for the power grid. Proyecto de investigación financiado por el Departamento de Energía de EE.UU. **www.tcipg.org**

What is the electric grid, and what are some challenges it faces? Departamento de Energía de EE.UU. **www.eia.doe.gov/energy_in_brief/power_grid.cfm**

Microchips piratas. John Villasenor en *Investigación y Ciencia*, n.º 409, págs. 84-89, octubre de 2010.



Michael Detay y **Björn Hróarsson** son volcanoespeleólogos. Hróarsson ha publicado numerosas obras dedicadas a los tubos volcánicos islandeses.

GEOLOGÍA

Túneles de lava

Las coladas de lava fluida discurren y forman tubos en los flancos de los volcanes. Al finalizar las erupciones, los tubos se vacían y dejan tras de sí galerías con curiosas estructuras de lava sólida

Michael Detay y Björn Hróarsson

Los tubos volcánicos, o túneles de lava, son estructuras que aparecen en los flancos de algunos volcanes, en el seno de coladas de lava cuya superficie se enfría y solidifica mientras la lava continúa fluyendo en su interior. Cuando el aporte de lava cesa, estas venas volcánicas se vacían y dejan tras de sí unas galerías con formas asombrosas. ¿Cómo se originan estas estructuras? Para responder a esta pregunta e ilustrar las características de estas formaciones tomamos como ejemplo los espectaculares túneles de lava islandeses.

Para que se formen los tubos volcánicos, la colada de lava debe ser fluida y, por tanto, hallarse a una alta temperatura (entre 1100 y 1200 ºC). Las lavas de este tipo son basálticas, es decir, pobres en sílice (menos del 50 por ciento). Se desarrollan en puntos calientes, como en Hawái o Islandia, donde tiene lugar una intensa actividad volcánica debido a que la temperatura del manto subyacente es más elevada que en otras zonas del planeta.

Los volcanólogos distinguen dos tipos de lava, que se designan con términos hawaianos: las lavas *aa*, que generan superficies rugosas al enfriarse, y las lavas *pahoehoe*, que originan estructuras superficiales en forma de cuerda, orientadas según la dirección del flujo de la colada en el momento de solidificarse.

Para la formación de un tubo se necesita que la lava sea poco viscosa y fluya sin interrupción. Los túneles se constituyen preferentemente en los segmentos de la colada con un caudal más elevado.

Si se reúnen todas esas condiciones, el exterior de la colada se solidifica, mientras que la lava continúa circulando en su interior como si se tratara de un desagüe volcánico. Estos desagües configuran un sistema ramificado semejante a una red de venas y arterias. Los tubos presentan paredes ignífugas, ya que están hechas de lava consolidada. Al terminar la erupción, la lava ya emitida continúa fluyendo y deja atrás un vasto conjunto de cavidades tubulares que en ocasiones quedan enterradas hasta 50 metros de profundidad.

En ocasiones, un mismo tubo canaliza flujos de lava de erupciones sucesivas. Una vez que la lava se ha enfriado, el túnel podrá visitarse si en el mismo se ha producido una abertura a causa de un colapso del techo o debido a obras de excavación. Las cavidades volcánicas más famosas se hallan en Estados Unidos,

EN SÍNTESIS

Un tubo volcánico se forma por el enfriamiento de las capas externas de una colada de lava fluida. Estas formaciones pueden alcanzar varias decenas de kilómetros de longitud.

Las lavas pobres en sílice, lo suficientemente fluidas para dar lugar a los tubos, son emitidas sobre todo por volcanes emplazados en puntos calientes.

La mitad de los 200 volcanes activos islandeses del Holoceno (últimos 10.000 años) presentan túneles de lava. Existen también tubos volcánicos en otros planetas del sistema solar y en sus satélites.



El túnel de lava de Ferlir (*arriba*) se encuentra en el campo de lava de Leitahraun, en Islandia. En este angosto pasadizo se observan estalactitas en «diente de tiburón», formaciones esculpidas por los gases que circulan por el interior del tubo al finalizar la erupción. El túnel de lava de Búri (*izquierda*) tiene las dimensiones de un túnel de metro. Las paredes exhiben huellas de coladas anteriores. En el suelo, la lava cordada (de tipo *pahoehoe*) conserva las líneas de flujo de la colada.

Las estalactitas de hielo de esta sala del túnel de Búri colorean la luz y crean un ambiente mágico.



Dos tragaluces dan acceso al tubo volcánico de Víõgelmir, un gigantesco tubo volcánico de 1585 metros de longitud y 148.000 metros cúbicos de volumen. Se trata de uno de los tubos volcánicos más grandes del planeta. Los estudios geofísicos de magnetometría y georradar han revelado la extensión de su red subterránea. Pero hasta ahora no se ha descubierto ningún acceso al tubo adyacente, de 1,2 kilómetros de longitud, que ha recibido el nombre de Hulduhellir («la cueva oculta»). Víõgelmir representa, por tanto, la única parte accesible de una red de tubos que podría ser mucho más vasta. En este aspecto, los volcanólogos hablan de tubos anastomosados, es decir, conectados entre sí como una red de venas y arterias. Pero también se conocen otros sistemas de tubos volcánicos intercontectados. La red más extensa es la del volcán Undara, en Australia, donde se han descubierto alrededor de 50 tubos o segmentos de tubos.



Los espeleotemas y otras estalactitas de lava del túnel de Jörundur parecen candelabros salidos de la fragua del escultor suizo Alberto Giacometti. Su aspecto metálico refleja los colores plateados del estaño, los rosáceos del cobre, los grises azulados del zinc y, en ocasiones, las tonalidades amarillas y relucientes del oro. Estas formaciones, que pueden alcanzar los 130 centímetros de altura, se originaron poco después de finalizar la erupción. Mientras las paredes del tubo se enfriaban, se produjo la extrusión de una gran cantidad de gotas de lava. Igual que la cera de una vela, las gotas se solidificaron y construyeron poco a poco estos «candelabros».

concretamente en Hawái, donde existe el tubo volcánico simple más largo que se conoce en la actualidad. Abarca un desnivel de 1102 metros y se ha explorado a lo largo de 65,5 kilómetros. Por su parte, el sistema de tubos de Undara, en Australia, se ha explorado a lo largo de una longitud total acumulada de 160 kilómetros. En Islandia, los túneles de Surtshellir-Stefánshellir («la cueva del gigante de fuego», de 3500 metros de longitud), Íshellir (de 500 metros de longitud) y Víõgelmir son los más famosos. Hasta el siglo XIX, Surtshellir representaba uno de los pocos tubos conocidos. Víõgelmir es uno de los 30 tubos más grandes del mundo: su volumen alcanza los 148.000 metros cúbicos, con una longitud de 1585 metros y un diámetro de hasta 27 metros.

Al contrario de lo que ocurre en las cuevas calcáreas, que se hallan en continua evolución, los tubos volcánicos se forman durante el transcurso de la erupción y quedan inmovilizados cuando la lava se enfría. A pesar de su origen distinto, contienen estructuras similares a las concreciones que aparecen en las cuevas calcáreas. Y, al igual que sus homólogos de calcita, los espeleotemas volcánicos pueden exhibir una belleza peculiar.

Los tubos contienen, además, estalactitas de lava o estafilitos. Se trata de formaciones que se generan después de la erupción, al desaparecer la corriente de lava y circular por el túnel gases a alta temperatura. Los estafilitos adoptan la forma de tubos, de «dientes de tiburón» o de helictitas, es decir, estructuras filiformes similares a fideos trenzados.

Las formaciones más frecuentes son las estalactitas tubulares, que se generan tras la evacuación de la lava. Se originan por la extrusión, a través de agujeros en la pared del tubo, de un magma parcialmente cristalizado que experimenta un enfriamiento de 1070 ºC a 1000 ºC. Debido a las circunstancias en que se forman, las estalactitas presentan una densidad y una composición mineralógica y química ligeramente diferentes a las de la lava original. El proceso de extrusión conlleva, además de la desgasificación de la lava, la aparición de estructuras en las paredes del túnel que recuerdan a las gotas que brotan de un tubo de pegamento agujereado. Por otro lado, las estalactitas en «diente de tiburón» son formas habituales y abundantes constituidas por la lava residual que todavía cuelga del techo del túnel durante el enfriamiento del mismo.

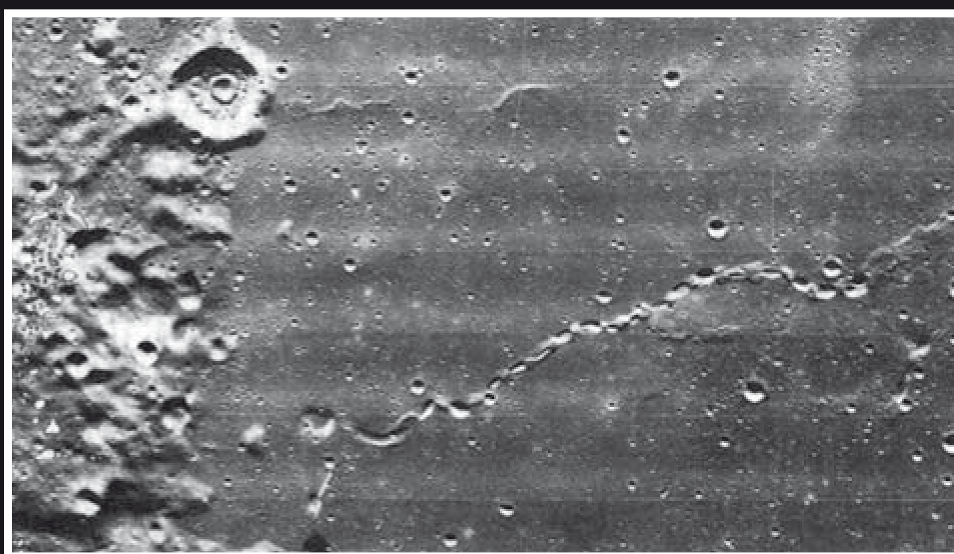
Los volcanoespeleólogos islandeses reconocieron pronto la belleza y la fragilidad de los espeleotemas que decoran los tubos volcánicos de su país y solicitaron a las autoridades la protección de los mismos. Esta pro-



Esta colada multicolor es probablemente única en el mundo. Seguramente se originó por el retrodrenaje de una bolsa de lava hacia el tubo principal, proceso que debió suceder en diferentes fases. Las «minicoladas» sucesivas de lava, cada una de ellas con distintos estados de maduración, velocidades de enfriamiento y estados de oxidación del hierro, explicarían esta sorprendente gradación de colores. El hierro varía desde las tonalidades rojizas, anaranjadas y amarillas en el estado oxidado (férrico) hasta las coloraciones verdosas en el estado reducido (ferroso). Hasta el día de hoy, solo una veintena de personas ha podido observar esta formación, debido a la dificultad en acceder hasta el seno del laberinto volcánico. Por otro lado, para llegar a la entrada del túnel de Ferlir por la ruta más corta se requieren tres horas de marcha, una de las cuales se invierte en escalar una pared de varios centenares de metros de altura. La otra dificultad reside en la estructura laberíntica del tubo, dividida en varios niveles o pisos. Estos corresponden a las distintas coladas que dieron lugar a todo el sistema. Se necesita un mapa para situarse en este oscuro laberinto que constituye una de las redes de tubos volcánicos más complejas de Islandia.

Tubos volcánicos colapsados en *Pavonis Mons*, el monte del pavo real, uno de los tres grandes volcanes de escudo situados en el ecuador de Marte (*derecha*). El volcán *Pavonis Mons* alcanza los 14.058 metros de altura por encima del nivel de referencia marciano. Los tubos se extienden sobre sus flancos, que presentan una suave pendiente (cuatro grados), según una foto tomada por la sonda *Mars Express* en octubre de 2004. Abajo se observa un tubo volcánico, de unos 40 kilómetros de longitud, en la superficie de la Luna, en la zona norte del océano de las Tempestades. Su trazado se caracteriza por la presencia de numerosos colapsos. Cabe recordar que las condiciones gravitacionales de la Luna favorecieron la formación de tubos de lava largos y profundos, de centenares de metros.





ESA/DLR/FU BERLÍN (G. NEUKUM (*Marte*); NASA/LUNAR AND PLANETARY INSTITUTE (*Luna*)

tección está recogida en una ley islandesa desde 1974. Los túneles de lava que alojan las formaciones más bellas solo pueden visitarse con una autorización oficial que se concede muy pocas veces, aunque sea para fines estrictamente científicos.

Esas medidas de protección resultan comprensibles, puesto que se trata de verdaderas rarezas geológicas. La mitad de los 200 volcanes activos islandeses del Holoceno (período que comprende los últimos 10.000 años) presentan tubos volcánicos. Como ya se ha mencionado antes, existen túneles en Estados Unidos (Hawái), Australia e Islandia, pero también en las islas Canarias, la isla Reunión, Corea e Italia. En Islandia se conocen más de 500. Y, lo que resulta más notable, también se han identificado en la Luna, Marte, Venus, Mercurio e Io, uno de los satélites de Júpiter.

En la actualidad, los volcanólogos continúan estudiando los túneles de lava y sus espeleotemas. Por otro lado, los arqueólogos islandeses han descubierto una región conocida como el «desierto de los crímenes»; en ella existen indicios de ocupación de algunos tubos por parte de forajidos durante el siglo x (siglo de la colonización escandinava). Del mismo modo, los polinesios de Hawái utilizaron algunos túneles de su isla como lugar de residencia o de culto, o como necrópolis.

Los hidrogeólogos estudian, además, los tubos que drenan los acuíferos volcánicos, y los biólogos se interesan por las bacterias extremófilas. Finalmente, aquellos que preparan la conquista del sistema solar conocen bien la localización de los tubos volcánicos extraterrestres: podrían constituir un hábitat providencial para el hombre del espacio exterior, que se convertiría de nuevo en un hombre de las cavernas...

PARA SABER MÁS

Formation of lava stalactites in the master tube of the 1792-1793 flow field, Mt. Etna (Italy). R. A. Corsaro et al. en *American Mineralogist*, vol. 90, págs. 1413-1421, 2005.

Íslenskir hellar. Vaka-Helgafell (Edda-útgáfa). Björn Hróarsson, 2006.

Islande — Splanedeurs et colères d'un île. M. Detay y A.-M. Detay. Belin, París, 2010.

14th International Symposium on Vulcanospeleology. Undara & Victoria, Australia, actas publicadas por la *National Spelology Society*, agosto de 2010.

John R. Carlson es catedrático de biología molecular, celular y del desarrollo en la Universidad de Yale. Ha estudiado las bases moleculares y celulares del olfato de los insectos durante 25 años.



Allison F. Carey, tras haber finalizado hace poco el doctorado en la Universidad de Yale, prosigue sus investigaciones sobre la malaria en el Instituto Pasteur de París.



CONTROL DE ENFERMEDADES

El olfato de los mosquitos

Conocer el modo en que un mosquito localiza a una persona ayudaría a diseñar mejores trampas y repelentes para poner fin a la propagación de la malaria

John R. Carlson y Allison F. Carey

Los mosquitos poseen un sentido del olfato sumamente refinado. Los que propagan la malaria en el África subsahariana se hallan dotados de un sistema extraordinario para localizar sangre humana. Atraídos por el olor y el sudor humanos, insertan con rapidez sus afiladas piezas bucales en la piel de las víctimas. Mientras se alimentan, su saliva transmite el parásito de la malaria a través de la herida. Con una simple picadura pueden cobrarse una vida.

Si se comprendiese mejor el funcionamiento del sistema olfativo del mosquito —el modo en que detecta los compuestos volátiles característicos de su fuente de alimentación—, podrían inventarse formas nuevas y más eficaces de camuflar esos olores o de interferir en el «radar» olfativo de los insectos para evitar las picaduras. En el mundo desarrollado las picaduras de los mosquitos suponen tan solo un incordio, pero en África y en otros lugares provocan, solo a causa de la malaria, casi un millón de muertes al año.

Nos contamos entre los numerosos investigadores empeñados en luchar contra la propagación de la malaria. Hemos realizado progresos fascinantes a la hora de desvelar el modo en que el mosquito *Anopheles gambiae*, el principal portador del parásito, detecta el olor de sus víctimas. Estos hallazgos están sugiriendo ideas para desarrollar repelentes y trampas que complementarían otras medidas defensivas, como los mosquiteros y una futura vacuna.

GENES PARA LOS OLORES

Para saber cómo localizan los mosquitos causantes de la malaria a sus presas humanas, decidimos estudiar primero otro insecto: la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. A diferencia del mosquito, esta mosca se reproduce con rapidez, se mantiene fácilmente en un laboratorio y sus genes pueden manipularse sin dificultad; constituye uno de los modelos experimentales más eficaces. Utilizamos, pues, *D. melanogaster* para desvelar los mecanismos celulares y moleculares básicos del sentido del olfato de los insectos. Esos conocimientos los aplicaremos más adelante en experimentos más complicados con mosquitos menos dóciles.

Las moscas de la fruta, al igual que los mosquitos, detectan los olores por medio de unos órganos que sobresalen de la cabeza, las antenas y los palpos maxilares. Las diminutas cerdas que recubren estas protuberancias ocultan las terminaciones de las neuronas especializadas en el olfato. Las moléculas olorosas se abren paso a través de los poros de las cerdas hasta alcanzar los receptores olfativos, moléculas sensibles al olor, que albergan en su interior. Cuando los compuestos olorosos se unen a los receptores, una señal eléctrica se desplaza a través de la célula nerviosa, o neurona, hacia el cerebro del insecto, donde informa sobre la sustancia volátil.

Durante años, se había intentado sin éxito determinar los genes de los receptores olfativos en insectos, con la esperanza de descubrir el modo en que los animales distinguen entre las innumerables sustancias olorosas presentes en el entorno. Por fin, los resultados empezaron a cosecharse en 1999. Nuestro equipo de la Universidad de Yale y otros grupos describieron los primeros genes que codificaban los receptores. Con el tiempo identificamos 60 genes de receptores olfativos en la mosca de la fruta. La secuenciación del ADN que codificaba los receptores nos llevaría a entender el funcionamiento de los mismos. También descubrimos la semejanza genética de los sistemas olfativos de la mosca de la fruta y del mosquito, de modo que el estudio de la primera arrojaría luz sobre el olfato del segundo.

DAVID SCHARF



EN SÍNTESIS

Hasta hace poco se desconocía el mecanismo por el que los mosquitos distinguen el olor de la respiración y del sudor humanos de otros olores de la naturaleza.

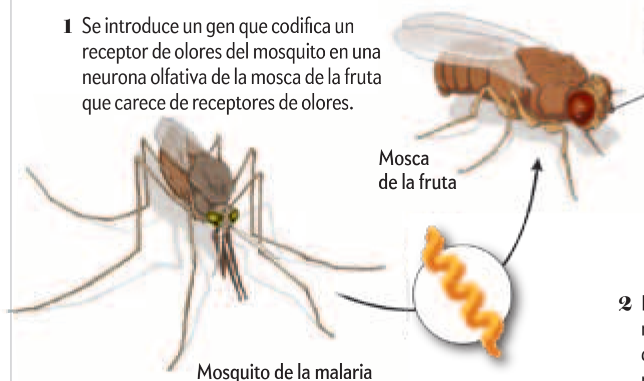
Los autores insertaron genes de mosquito en moscas de la fruta criadas en laboratorio para que produjeran detectores de olores. Estos demostraron sensibilidad a 110 sustancias volátiles. Los experimentos revelaron que un pequeño conjunto de los detectores del mosquito se hallan altamente especializados en la identificación de los olores humanos.

El descubrimiento de sustancias que confundan o inhiban a los receptores especializados facilitaría el desarrollo de trampas y repelentes mejorados que ayudarían a reducir la propagación de la malaria.

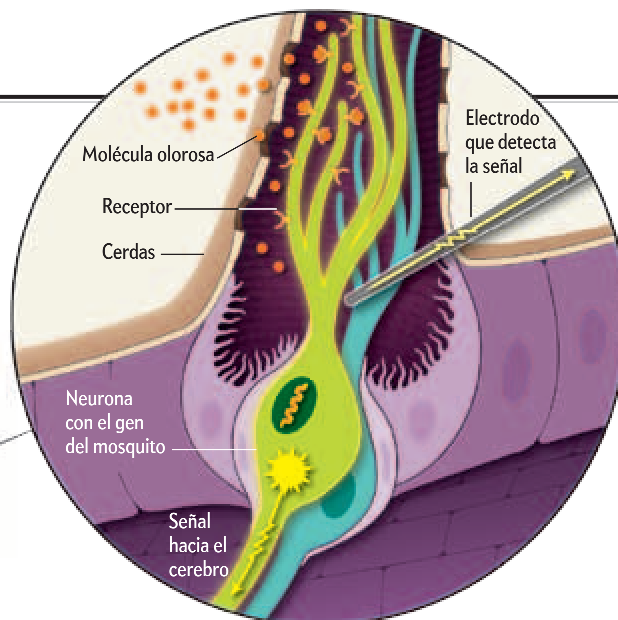
PROCESO EXPERIMENTAL

Un mutante que distingue olores

Mediante el empleo de moscas de la fruta mutantes, se han identificado los receptores olfativos del mosquito que responden intensamente ante ciertos olores humanos.



1 Se introduce un gen que codifica un receptor de olores del mosquito en una neurona olfativa de la mosca de la fruta que carece de receptores de olores.



2 El gen hace que la neurona produzca los receptores codificados, que se unen a las moléculas olorosas de una forma determinada. Se presenta a la mosca varios tipos de moléculas odorantes por separado. Si los receptores se unen a esa sustancia, la neurona envía una señal al cerebro que indica la presencia del olor. Un electrodo permite saber que se ha producido una respuesta.

Un hallazgo clave se produjo gracias al empleo de un mutante de *D. melanogaster*, que carecía del gen *Or22a*, el primer gen de un receptor del olor de la mosca de la fruta descubierto en nuestro laboratorio. Uno de los principales objetivos consistía en determinar la correspondencia entre los distintos receptores de la mosca y los diferentes olores. Una neurona posee miles de receptores, todos ellos idénticos; cada tipo de receptor se une solo a un pequeño grupo de moléculas olorosas. Distintas neuronas poseen diversos tipos de receptores que se unen a otros grupos de moléculas olorosas. Como las moscas de la fruta mutantes carecían del gen para un determinado receptor olfativo, partimos de la hipótesis de que albergarían un tipo de neurona sin receptores o, dicho de otro modo, «vacía».

Efectivamente, así era. Con la aplicación de refinadas técnicas genéticas desarrolladas para el estudio de *D. melanogaster*, insertamos un gen de un receptor de la mosca de la fruta en esa neurona que, a continuación, empezó a sintetizar la molécula del receptor. Después determinamos, para cada receptor, el tipo de sustancias olorosas que lo activaba. Mediante la introducción sistemática de los receptores de olores de *D. melanogaster* en una neurona vacía, uno distinto cada vez, y tras la exposición de la neurona a diversos compuestos olorosos, descubrimos cuál de esas sustancias generaba una respuesta en cada uno de los múltiples receptores del insecto.

Se han observado resultados similares en el sistema olfativo de los mamíferos. Por tanto, los animales, desde la mosca de la fruta hasta el ser humano, detectan los olores del mismo modo: cada olor activa cierta combinación de receptores. Esta estrategia explicaría por qué los animales, entre ellos los mosquitos, discriminan entre el amplio abanico de olores presentes en la naturaleza sin necesidad de poseer un receptor específico para cada tipo de olor.

UNA MOSCA CON EL OLFATO DE UN MOSQUITO

Tras haber caracterizado los genes de los receptores olfativos de la mosca de la fruta, nos propusimos insertar genes de receptores del mosquito portador de la malaria en la neurona vacía de la mosca. En colaboración con los grupos de Laurence J. Zwiebel, de la Universidad Vanderbilt, y Hugh M. Robertson, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, habíamos identificado una familia de 79 genes que probablemente correspondían a genes de receptores olfativos de *A. gambiae*. Lo logramos tras una búsqueda de secuencias de ADN parecidas a las de los genes de los receptores de la mosca de la fruta. Si transferíamos cualquiera de esos genes en una neurona vacía de la mosca de la fruta, esta podría sintetizar, en teoría, un receptor olfativo del mosquito. Pero resultaba bastante probable que el experimento fracasara. Las dos especies de insectos se hallan separadas por 250 millones de años de evolución. Ignorábamos por completo si un gen de receptor de mosquito funcionaría en una neurona de la mosca de la fruta.

Nuestro sistema experimental se halla conectado a un altavoz, de modo que si una neurona olfativa emite un impulso, un electrodo lo detecta y el altavoz genera una serie de chasquidos entrecortados. Cuando ensayamos una serie de sustancias olorosas en la primera neurona vacía de mosca en la que habíamos introducido un gen de mosquito, el altavoz permaneció en silencio, para nuestra decepción. Sospechábamos que el receptor del mosquito no funcionaba en la neurona de la mosca de la fruta. Pero proseguimos con las pruebas. Cuando utilizamos el 4-metilfenol, el altavoz empezó a emitir sonidos y nos sentimos entusiasmados. Más tarde descubrimos que esta molécula (cuyo olor recuerda al de los calcetines usados) es uno de los componentes del sudor humano. Habíamos descubierto una forma de averiguar qué olores provocaban una respuesta en cada tipo de receptor del mosquito, una información que nos permitiría entender el modo en que los mosquitos localizan a sus presas humanas y averiguar una manera de impedirlo.

Con ese resultado tan estimulante en la mano, nos informamos ampliamente sobre las sustancias olorosas humanas y seleccionamos 110 compuestos para examinarlos, entre ellos, numerosos componentes del sudor humano. Incluimos sustancias con estructuras moleculares diversas, con lo que generamos una amplia gama de muestras. Uno a uno, empezamos a transferir

TOMMY MOORMAN

a las neuronas vacías los 79 posibles genes de receptores de *A. gambiae*. Cincuenta de las moléculas de receptor acabaron funcionando en nuestro montaje experimental. A continuación, ensayamos las 110 sustancias con cada uno de los 50 receptores funcionales, lo que dio lugar a 5500 combinaciones de una sustancia olorosa con un receptor.

A partir de ese conjunto de datos, centramos nuestra atención en varios receptores muy especializados, que respondían solo a una o muy pocas sustancias. Pensábamos que si un mosquito necesitaba detectar un compuesto con un elevado grado de sensibilidad y especificidad —en particular, uno que indicara una fuente de sangre— el insecto debía de utilizar un receptor adaptado a ese fin. De hecho, descubrimos que la mayoría de los receptores altamente especializados respondían a los componentes del sudor humano. Uno de ellos era el primer receptor de mosquito ensayado en la neurona vacía (el receptor que respondía al 4-metilfenol). De las 110 sustancias, solo unas pocas excitaban a ese receptor con tal intensidad. Otro receptor respondía de modo específico al 1-octen-3-ol, sustancia frecuente en el olor humano y animal. El compuesto atrae con fuerza a varias especies de mosquito, entre ellas *Culex pipiens*, de amplia distribución en el hemisferio norte y portador potencial del virus del Oeste del Nilo. Algunas trampas comerciales que atraen a los mosquitos y los alejan de las personas emiten 1-octen-3-ol.

BLOQUEAR LOS NERVIOS DE LOS INSECTOS

Nuestros resultados podían acelerar el desarrollo de mejores repelentes y trampas contra los mosquitos. Un método estándar para analizar la eficacia de los posibles repelentes consiste en colocarlos en trampas que se dejan en el campo para ver si atraen a los mosquitos. Debido a la lentitud del proceso, solo se puede ensayar un número limitado de compuestos. Los experimentos clásicos de laboratorio también presentan inconvenientes. Suelen basarse en voluntarios humanos a los que se aplica una sustancia sobre un brazo que, a continuación, introducen en una caja transparente con docenas de mosquitos; las sustancias que evitan las picaduras se investigan para su posible uso como repelentes. Nuestra estrategia nos permite examinar muchos más compuestos en poco tiempo, con lo que aumenta la probabilidad de descubrir nuevos y más eficaces señuelos o repelentes sin la necesidad de utilizar personas.

Zwiebel introduce receptores de sustancias olorosas de *A. gambiae* en células cultivadas en pequeñas placas de Petri. Mediante robots, expone las células a miles de compuestos en tan solo unas pocas horas. Hasta la fecha, ha analizado más de 200.000 sustancias; de ellas, más de 400 han activado o inhibido los receptores. Estos compuestos serán analizados en experimentos posteriores y los mejores pasarán a la fase de ensayos de campo.

La estrategia de laboratorio también nos permite buscar compuestos «superactivadores» que bloquean las neuronas olfativas: al sobreexcitarlas dejan de emitir señales o, si lo hacen, confunden al cerebro del mosquito. Esas sustancias podrían esparcirse en las proximidades de las chozas en las que duermen los habitantes del África subsahariana, y así se impediría que los mosquitos portadores de la malaria los localizaran. Los análisis en el laboratorio ayudarían a identificar sustancias que inhibieran los receptores altamente especializados, con lo que se anularía la capacidad del insecto para detectar un objetivo. Al rociarse estos productos en las chozas o incluirse en los repelentes que se aplican sobre la piel, se evitaría que los mosquitos se dieran cuenta de la proximidad de una víctima. Podrían descubrirse, además, compuestos que resultaran desagradables a los mosquitos, para ser utilizados a modo de repelentes. Nuestros colaboradores de la Universidad de Wageningen realizan experimentos con la especie *A. gambiae* para determinar si ciertas mezclas de compuestos que hemos identificado servirían para tales fines. Ya han obtenido algunas combinaciones prometedoras.

Históricamente, varios métodos para el control de los insectos, como la fumigación con el insecticida DDT, han causado daños en los animales y quién sabe si también en las personas. Las técnicas basadas en el sentido del olfato suelen resultar menos perjudiciales. Una trampa olfativa necesita tan solo una pequeña cantidad de la sustancia atrayente, porque los mosquitos son muy sensibles a estos señuelos. Además, los compuestos atrayentes presentes en el sudor y la respiración de los humanos no deberían resultar tóxicos en pequeñas dosis. En el caso de añadirse venenos a las trampas, estos quedarían confinados en un espacio reducido y se evitaría el riesgo de contaminación. Por otro lado, los métodos basados en el sentido del olfato resultarían más precisos que el control mediante insecticidas. Se ha observado que la mayoría de los receptores altamente especializados de *A. gambiae* responden ante los compuestos del sudor humano, mientras que en *D. melanogaster* ese tipo de receptores reaccionan ante las sustancias volátiles de la fruta. Con el fin de reducir al mínimo las alteraciones ambientales, se pueden preparar mezclas que atraigan sobre todo a un insecto concreto. En general, los métodos basados en el sentido del olfato deberían ser mucho menos perjudiciales para el medio natural y más aceptables desde el punto de vista político que la fumigación indiscriminada de venenos. Y si en lugar de un único compuesto se aplicara un cóctel de sustancias eficaces, las resistencias en las poblaciones de mosquitos aparecerían con menor frecuencia.

Para que los agentes descubiertos con nuestros métodos resulten útiles a las naciones sumidas en la pobreza, deberían fabricarse en envases baratos. Las trampas que liberan dióxido de carbono a partir de bombonas de gas comprimido (muy utilizadas en los países ricos) resultan poco prácticas en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo. Además, los compuestos atrayentes y repelentes tienen que ser químicamente estables en las calurosas regiones tropicales. Aún está por ver si todos estos requisitos se podrán cumplir.

Se necesita una estrategia múltiple para erradicar la malaria. Los mosquiteros y los medicamentos mejorados desempeñan un papel fundamental. Los investigadores no descansan en sus intentos por desarrollar una vacuna. Aun así, la necesidad de añadir nuevas herramientas a nuestro arsenal contra la malaria resulta apremiante. La manipulación precisa del comportamiento del mosquito, guiado por su olfato, podría representar un gran avance. En la lucha contra una enfermedad que afecta a cientos de millones de personas cada año, incluso una pequeña contribución podría significar una enorme diferencia para la vida de muchos.

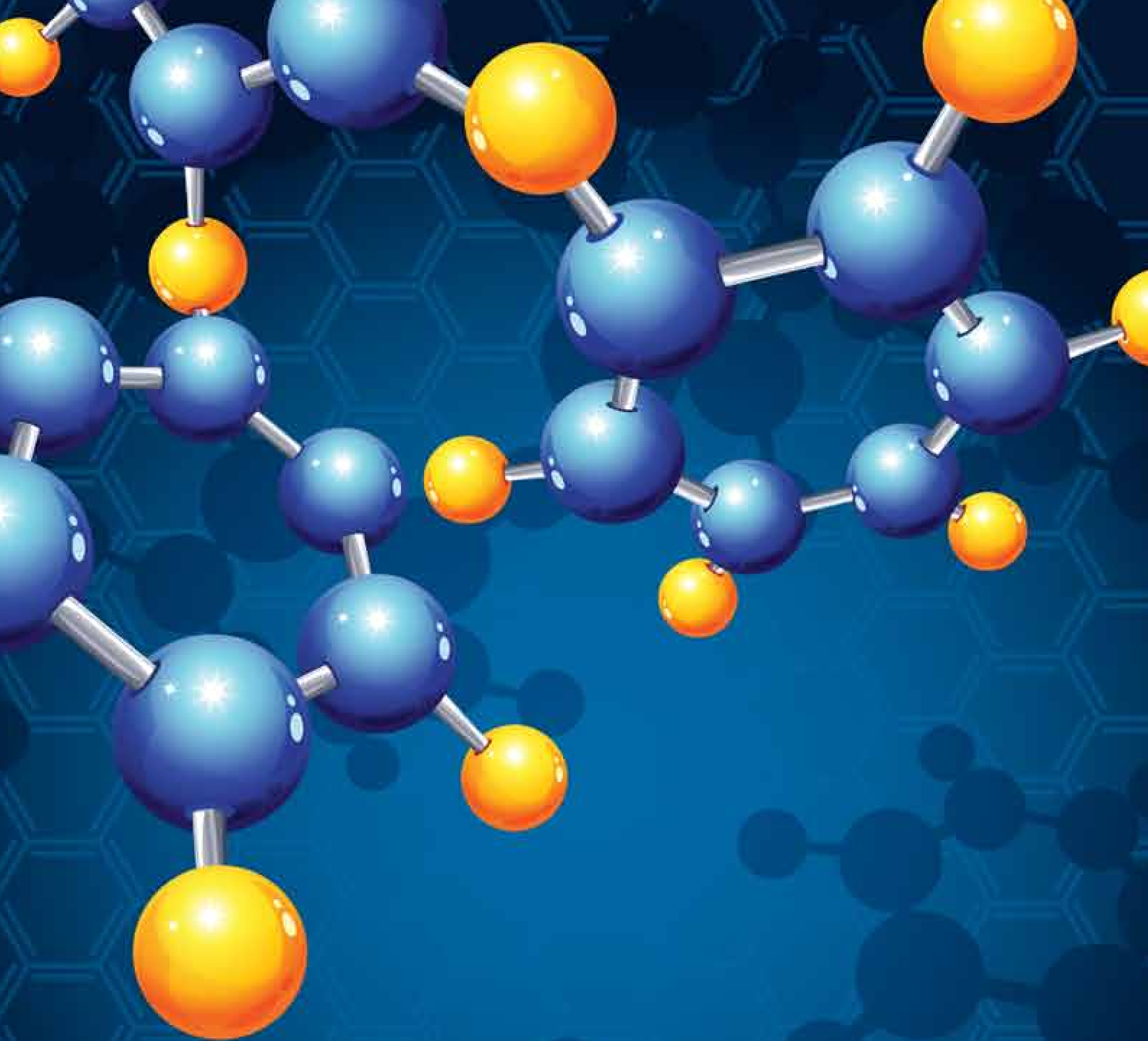
PARA SABER MÁS

Olfactory regulation of mosquito-host interactions. Lawrence J. Zwiebel y W. Takken en *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, vol. 34, n.º 7, págs. 645-652, julio de 2004.

Insects as chemosensors of humans and crops. Wynand van der Goes van Naters y John R. Carlson en *Nature*, vol. 444, págs. 302-307, 16 de noviembre de 2006.

Odorant reception in the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. Allison F. Carey y col. en *Nature*, vol. 464, págs. 66-71, 4 de marzo de 2010.

Página web de la Organización Mundial de la Salud dedicada a la malaria: **www.who.int/topics/malaria/es**



QUÍMICA

Tras el enlace

Ahora más que nunca, nuevas técnicas muestran que el enlace químico es una ficción conveniente, que sin embargo mantiene cohesionada el área de la química

Philip Ball

Philip Ball es químico y doctor en física por la Universidad de Bristol. Fue editor de *Nature* durante más de veinte años. Ha escrito numerosos libros y artículos de divulgación científica.



Hasta hace poco, el texto estándar sobre la teoría del enlace para estudiantes de química era el *Valence* de Charles Coulson (1952). La opinión de este químico teórico sobre esos palitos que tantas generaciones de alumnos han dibujado para enlazar átomos y formar moléculas está ausente del texto. «Un enlace químico no es ninguna cosa real; no existe, nadie lo ha visto nunca, ni nadie podrá. Es un producto de nuestra propia imaginación», escribió más tarde en una conferencia titulada *The spirit of applied mathematics*.

Existe una buena razón para posponer esa verdad incómoda. El enlace es, literalmente, el adhesivo que da coherencia a toda la disciplina; el considerarlo una realidad objetiva resulta necesario para cualquier discurso sobre química. La disciplina está de hecho entretejida de semejantes ficciones convenientes —y cuestionadas—, como la electronegatividad, el estado de oxidación, el tautomerismo y la acidez.

Las disputas sobre la descripción correcta del enlace han encrespado los ánimos de los químicos ya desde que el concepto de estructura molecular emergió a mediados del siglo xix. En la actualidad vuelven a proliferar, al tiempo que nuevas técnicas teóricas y experimentales abren nuevos caminos para investigar y cuantificar los enlaces químicos. Las medidas tradicionales como la distancia interatómica cristalográfica y la energía de disociación han sido complementadas con técnicas espectroscópicas para determinar frecuencias de vibración, métodos como la resonancia magnética nuclear para medir el desplazamiento del entorno electrónico de los átomos y sus interacciones magnéticas, la medición de constantes de fuerza (rigidez del enlace) y una legión de herramientas de la química cuántica para calcular aspectos como la distribución o localización electrónica.

Un indicio de los cambios fundamentales que están teniendo lugar es la decisión reciente de redefinir el carácter del enlace por puente de hidrógeno en el actual contexto de resultados experimentales que cambian la descripción electrostática tradicional.

El carácter del enlace químico hoy en día se complica aún más por la introducción de la dimensión dinámica. Tradicionalmente, las moléculas han sido consideradas, si no estáticas, al menos como si tuvieran estructuras arquitectónicas que eran sacudidas y rotadas por movimientos térmicos. Los enlaces pueden estirarse y doblarse, pero aun así, se caracterizan por una distancia de equilibrio y una fuerza que parecen justificar que se los ilustre mediante líneas y palitos. Actualmente, y gracias a las espectroscopías ultrarrápidas, tales valores promediados en el tiempo puede que no siempre caractericen de forma precisa ni la estructura ni la reactividad. Aquello que se mide en un enlace depende no solo de cómo sino también de cuándo se mide.

Algunos químicos discuten que, como resultado de todo ello, la mera existencia —o no— de un enlace depende del modo en que se investigue el problema. Otros, por el contrario, defienden unos criterios absolutos. Esta diferencia de opinión alcanza el núcleo de lo que es la química: ¿puede reducirse todo a la física cuántica, o son esenciales las reglas imprecisas? De modo más apremiante, el problema de cuál es la mejor forma de describir un patrón de enlace químico tiene implicaciones tangibles para un amplio conjunto de cuestiones, que van desde moléculas en las que los átomos se ven forzados a apartarse de sus geometrías de enlace usuales, pasando por el enlace de hidrógeno simétrico (en el que un átomo de hidrógeno enlazado se halla compartido de forma equitativa por otros dos átomos), y llegando hasta nuevas variaciones de viejos temas, como la aromaticidad (patrones especiales de enlaces «deslocalizados», como los del benceno).

Prácticamente todas las áreas de la química albergan sus propios interrogantes sobre el enlace. La mayoría ilustran que nuestra comprensión sobre las formas en que las reglas cuánticas permiten a los átomos unirse dista de ser exhaustiva y que, como consecuencia, la inventiva sintética de los químicos adolece de una limitada visión de las posibilidades existentes.

EN SÍNTESIS

Nadie ha visto nunca un enlace. Pese a tratarse de un concepto fundamental en química, no halla correspondencia en el mundo real.

Los modelos teóricos que describen el enlace se han ido refinando, sobre todo con el desarrollo de la química cuántica y la consideración de la correlación electrónica. Aun así, la definición de enlace entraña todavía numerosas cuestiones sin resolver.

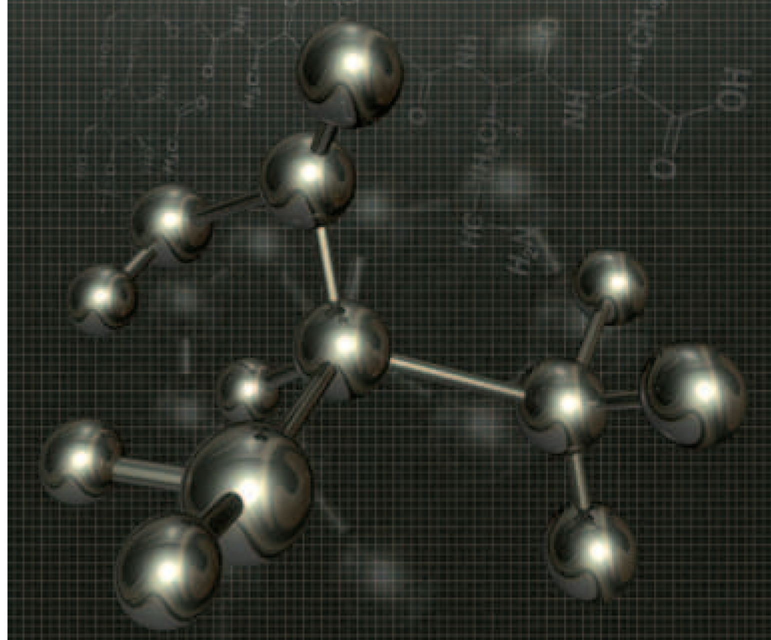
Al comportamiento de los electrones hay que añadir ahora el de los núcleos, cuyo movimiento resulta también fundamental para comprender la estructura y el comportamiento de las moléculas.

ESCULPIENDO ELECTRONES

Todos estamos de acuerdo en una cosa: el enlace químico tiene algo que ver con los electrones. Dos átomos se mantienen juntos debido a la disposición de los electrones alrededor de sus núcleos. En el siglo xix se creía que esta atracción era electrostática: que los átomos en las moléculas se hallaban ionizados positiva o negativamente. Ello dejaba sin resolver el enigma de cómo átomos idénticos pueden formar moléculas diatómicas del tipo H_2 y O_2. El químico G. N. Lewis propuso que el enlace podía en cambio darse como resultado de la compartición de electrones para crear capas llenas de ocho, visualizados como los vértices de un cubo.

En los años veinte y treinta del siglo xx, otro químico, Linus Pauling, mostró el modo en que esa interacción podía formularse en el lenguaje de la mecánica cuántica en términos del solapamiento de orbitales electrónicos. En esencia, si dos orbitales atómicos conteniendo cada uno un único electrón pueden solaparse, se forma un enlace. Pauling generalizó trabajos anteriores sobre la descripción mecanocuántica del hidrógeno para escribir una ecuación aproximada para la función de onda creada mediante el solapamiento orbital. Nos referimos a la descripción del enlace de valencia (EV).

Pero ello constituye solo una aproximación. Más o menos al mismo tiempo, Robert Mulliken y Friedrich Hund propusieron aún otra función de onda aproximada, la cual conducía a una forma alternativa de explicar los enlaces: no como solapamiento entre orbitales específicos sobre átomos separados, sino como orbitales electrónicos que se extendían sobre varios átomos, denominados orbitales moleculares (OM). Los méritos relativos de las descripciones EV y OM fueron debatidos con energía durante varias décadas, y dejando muy poco aprecio entre los protagonistas: la máxima harto repetida por Mulliken, «creo que el enlace químico no es tan simple como alguna gente parece creer», era una alusión provocativa a Pauling. En los años sesenta, a pesar de las buenas dotes de vendedor de Pauling, se creía que la teoría OM era la más adecuada en la mayoría de las aplicaciones. Pero la discusión no ha terminado. Roald Hoffmann, de la Universidad de Cornell en Ithaca, Nueva York, insiste en que «descartar cualquiera de las dos teorías socava el legado intelectual de la química».



Ambas opciones son imperfectas, porque insisten en escribir la función de onda electrónica como una combinación de las funciones de onda de los electrones individuales. Esta es también la base del método de Hartree-Fock para calcular la función de onda y la energía del estado de más baja energía (estado fundamental) de un sistema molecular —un método que empezó a ser aplicable en los años cincuenta del siglo xx, cuando los ordenadores hicieron posible la resolución numérica de las ecuaciones—. Mas separar la función de onda en componentes de un solo electrón no deja de ser una ficción, dado que se influyen unos a otros: el comportamiento de un electrón depende de lo que estén haciendo el resto de ellos. La diferencia entre la energía verdadera del estado fundamental y la calculada mediante el método de Hartree-Fock se denomina energía de correlación. La mayoría de los métodos computacionales recientes capturan la mayor parte de la energía de correlación, pero ninguno puede dar la solución exacta. Como resultado, la descripción del enlace mecanocuántico es una cuestión de gustos: todas las descripciones son, de hecho, maneras aproximadas de esculpir la distribución electrónica.

Si ello fuera el final de las ambigüedades del enlace, habría poco sobre lo que discutir. Pero no lo es. Existe, entre otras cuestiones, la de cuándo considerar que dos átomos se hallan enlazados. La definición un tanto tautológica de Pauling reveló involuntariamente las reglas del juego: un grupo de átomos se considerará enlazado cuando sea «conveniente para el químico considerarlo una especie molecular independiente». Pauling admitió algunas de las ambigüedades que se derivan de ello. Por ejemplo, si bien su definición generalmente excluye las atracciones débiles de van der Waals que ocurren entre todos los átomos, en ocasiones —como en la asociación de dos moléculas de oxígeno en el clúster O_4— esta fuerza puede ser lo bastante intensa como para ser considerada un enlace químico.

Tampoco sirve de nada sugerir —como hizo Coulson— que un enlace existe siempre que la energía combinada de los átomos es menor que la que tienen cuando se hallan separados a distancia infinita. Este es en esencia siempre el caso, al menos para los átomos eléctricamente neutros. Incluso dos átomos de helio experimentan una atracción de van der Waals, razón por la cual el helio es líquido a temperaturas muy bajas, y sin embargo no suele considerarse que estén por ello enlazados.

Además, la cuestión del «enlazados o no» se torna dependiente del contexto una vez los átomos se hallan insertados en una molécula, donde pueden ser obligados a permanecer cerca uno del otro meramente por los átomos que los rodean, y donde inevitablemente se da una cierta arbitrariedad al decidir qué electrones «pertenecen» a qué átomos. Las ambigüedades resultantes fueron ilustradas en fecha reciente cuando tres expertos, Santiago Álvarez, Roald Hoffmann y Carlo Mealli, no lograron ponerse de acuerdo sobre si dos átomos de azufre en un compuesto organometálico se hallaban unidos por un enlace. La discusión, publicada en 2009 en *Chemistry: a European Journal* bajo el título «A bonding quandary —or— a demonstration of the fact that scientists are not born with logic», involucraba diferentes interpretaciones de cálculos de química cuántica, debates sobre cuáles son los mejores criterios para identificar un enlace y los datos de casos precedentes de compuestos comparables.

Todo ello es tan solo un recordatorio de que una molécula corresponde, en última instancia, a un conjunto de núcleos sumergidos en una nube electrónica continua que estabiliza una configuración particular, la cual a veces puede representarse mediante bolas y palitos, y a veces no. Sin embargo, las discusiones sobre el enlace químico no son solo semánticas. Importa si consideramos un enlace múltiple fuerte como un enlace quíntuple o séxtuple, incluso aunque esta sea una categorización que solo reconocen los libros de texto y no la naturaleza —en particular, porque los conceptos de los libros de texto proporcionan a una disciplina coherencia intelectual y consistencia.

Más aún, la forma en que hablemos de los enlaces puede determinar nuestra capacidad de racionalizar comportamientos químicos reales. Por ejemplo, las distintas descripciones de los enlaces en los hoy llamados iones no clásicos de hidrocarburos —cuyos méritos relativos fueron debatidos con intensidad en los años cincuenta y sesenta del siglo xx— tienen implicaciones directas en la forma en que se predice que estas especies reaccionarán. Considerar el enlace no clásico (electrones distribuidos sobre más de dos núcleos atómicos) o tautomérico (rápidas fluctuaciones entre enlaces convencionales a dos átomos) tenía consecuencias inmediatas para la química orgánica.

¿Podríamos tratar de encontrar una distinción entre átomos enlazados y no enlazados en términos de cómo varía la fuerza entre los dos átomos con su separación? Sí, existe un decaimiento exponencial para un enlace covalente como el del H_2 y una ley de decaimiento potencial para una interacción de van der Waals. Pero la falta de una diferencia clara entre estos dos extremos ha sido enfatizada en las dos últimas décadas por el fenómeno de la aurofilia, en la que átomos de oro unidos a unos pocos grupos químicos en compuestos organometálicos tienden

a agregarse, formando dímeros y cadenas lineales. Las interacciones básicas en estos enlaces aurofílicos entre átomos de oro tienen el mismo origen que la fuerza de van der Waals: las nubes electrónicas «perciben» los movimientos las unas de las otras, de forma que fluctuaciones aleatorias de una se traducen en fluctuaciones especulares en la otra. Pero aquí esta interacción se ve modificada por efectos relativistas: los cambios en las energías de los electrones como resultado de sus altas velocidades en torno a los núcleos de oro altamente cargados y masivos. Los enlaces aurofílicos han sido descritos, en consecuencia, como una interacción de tipo «súper van der Waals». ¿Los convierte ello en verdaderos enlaces? Tratarlos de ese modo tiene significado desde el punto de vista químico (pueden servir para formar nuevos cristales moleculares «de diseño»), pero a costa de prescindir de otro criterio potencial para enlaces «reales».

OBJETIVO MÓVIL

Quizás el desafío más grande para la descripción del enlace químico sea la dinámica. Los movimientos atómicos tornan compleja incluso a una molécula sencilla; cualquier movimiento de un núcleo requiere el ajuste de la totalidad de la nube electrónica. Un temblor de un grupo de núcleos puede facilitar que otros se escindan de la molécula.

Esa complicación no solía importar en química, porque los movimientos de los núcleos eran demasiado rápidos para poderse observar —por no hablar de sacarles provecho—. Pero los pulsos láser ultracortos han desplazado la línea de gol. Hoy, la energía puede bombearse a un modo vibracional concreto para debilitar un enlace específico, permitiendo una cirugía molecular selectiva. Los químicos pueden inquirir sobre el comportamiento de una molécula en un instante particular de su evolución dinámica [*véase* «Microscopía electrónica ultrarrápida», por Ahmed H. Zewail; Investigación y Ciencia, octubre de 2010]. Incluso un enlace fuerte se debilita cuando una vibración lo estira más allá de su distancia promedio, de equilibrio, por lo que en química ultrarrápida puede haber dejado de tener sentido caracterizar simplemente los enlaces como fuertes o débiles.

Como dice Fleming Crim, de la Universidad de Wisconsin-Madison: «un enlace es una entidad descrita por la mecánica cuántica pero no una entidad "fija", porque se comportará de modo distinto en función de cómo lo perturbemos e interroguemos». La trayectoria de una reacción química debe, pues, considerarse no como la creación y rotura de enlaces sino como la evolución de los átomos sobre una superficie de energía potencial. Ello siempre estuvo implícito en los clásicos dibujos de estados de transición en forma de agrupaciones moleculares que contenían líneas discontinuas, una suerte de «casi enlace» en proceso de formación o destrucción. Ahora se ha revelado que esta imagen no es más que una mera caricatura de un complicado proceso dinámico en el espacio y el tiempo.

Subyacente a todas esas discusiones se halla una asunción tácita de la que cabe hablar. Nos referimos a la idea, cuando no de un «enlace» como una entidad estable, sí al menos de un estado enlazado instantáneo para una determinada configuración de los núcleos. Ello equivale a asumir que los electrones pueden ajustarse de manera más o menos instantánea a cualquier cambio en las posiciones nucleares: la aproximación de Born-Oppenheimer. Dado que los electrones son tan ligeros en comparación con los nucleones, esta suposición está por lo general justificada. Sin embargo, se han documentado ya varios fallos de esta aproximación, sobre todo en sistemas de estado sólido. De hecho, la superconductividad es una de sus consecuencias, pues resulta del acoplamiento entre los movimientos electrónico y nuclear. Tales fenómenos también ocurren en moléculas, de modo especial en la fotoquímica de moléculas poliatómicas, las cuales disponen de un gran número de estados electrónicos próximos en energía; también se han observado en moléculas diatómicas sencillas en campos eléctricos intensos. Como resultado, los grados de libertad moleculares pueden hacerse interdependientes de formas extrañas (por ejemplo, la rotación de la molécula puede excitar sus vibraciones). En tales situaciones, la misma noción de un estado electrónico empieza a derrumbarse.

Esos avances en el control dinámico de estados cuánticos constituyen nada menos que una nueva visión de la química. La imagen estática de las moléculas con formas específicas y fuerzas de enlace es reemplazada por otra de un amasijo de átomos en movimiento, que pueden ser amoldados y coaccionados para que adopten comportamientos bastante distintos de aquellos de las especies en equilibrio. Tal visión no exige que abandonemos las viejas ideas sobre el enlace químico, ni cuestiona la capacidad de la teoría cuántica para describir átomos y sus uniones. Nos recomienda que veamos estos enlaces como grados de atracción que crecen y se desvanecen, o como representaciones icónicas del viaje perpetuo de la molécula por su paisaje de energía libre.

En una conferencia en 1970, Coulson afirmó que la simple noción del enlace químico ya se había perdido, y que «algo más grande» era necesario para reemplazarlo. Él mismo propuso dedicar a este tema un nuevo congreso cincuenta años más tarde. El momento casi ha llegado.

Sin embargo, no debe irritarnos que las «reglas» del enlace estén a disposición de cualquiera, más bien lo contrario. Si bien puede haber algunas partes de la ciencia lo bastante afortunadas como para ser explicadas de forma exhaustiva por una teoría única y general, no es lo común. Nos enfrentamos típicamente con varias teorías, algunas se superponen, otras se contradicen, y otras son tan solo diferentes expresiones de una misma cosa. Nuestra elección del marco teórico puede ser determinada más por razones subjetivas que por el criterio tradicional de ser consistentes con el experimento. De acuerdo con Hoffmann, estas preferencias a menudo tienen un componente estético, que depende de factores como la simplicidad, la utilidad para explicar una historia sobre el comportamiento químico, las necesidades sociales de la comunidad y la cuestión de si la descripción es productiva.

Como Hoffmann dice: «Cualquier definición rigurosa del enlace químico está condenada a ser empobrecedora». Vale la pena seguir su consejo de «divertirse con la riqueza difusa de la idea».

Artículo original publicado en *Nature* 469, págs. 26-28, 2011.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2011

PARA SABER MÁS

The nature of chemical bond. Linus Pauling. Cornell University Press, 1939.
Conversation on VB vs. MO theory: a never ending rivalry? R. Hoffmann, S. Shaik y P. C. Hiberty en *Accounts of Chemical Research*, vol. 36, págs. 750-756, 2003.
Beyond Born-Oppenheimer: Conical intersections and their impact on molecular dynamics. Graham A. Worth y Lorenz S. Cederbaum en *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 55, págs. 127-158, 2004.
90 years of chemical bonding. Dirigido por Gernot Frenking y Sason Shaik en *Journal of Computational Chemistry* (número especial), vol. 28, págs. 1-466, 2007.
Theoretical chemistry of gold. P. Pyykkö en *Chemical Society Reviews*, vol. 37, págs. 1967-1997, 2008.
The chemist's concept of molecular structure. N. Sukumar en *Foundations of Chemistry*, vol. 11, n.º 1, págs. 7-20, 2009.



ENERGÍA

BIOCOMBUSTIBLES: UNA PROMESA FALLIDA

La sustitución del petróleo por combustibles de origen vegetal entraña mayores dificultades de las que se pensaba

David Biello

LEVI BROWN

La apuesta de Range Fuels era arriesgada pero seductora. Esta empresa, fundada por Mitch Mandich, antiguo directivo de Apple, logró atraer millones de dólares de capital privado y hasta 156 millones de dólares en subvenciones y créditos del gobierno de EE.UU. Proyectaba la construcción de una gran planta de biocombustibles que transformaría 1000 toneladas diarias de astillas de madera y desechos de la industria papelera en más de un millón de litros de etanol. Durante la ceremonia de apertura, en noviembre de 2007, el entonces secretario de Energía de EE.UU., Samuel Bodman, declaró que habían seleccionado a Range Fuels por considerarla la «flor y nata» del sector.

A principios de este año, Range Fuels cerraba su recién estrenada refinería biológica sin haber vendido ni una gota de etanol: convertir biomasa en carburante líquido había resultado mucho más difícil de lo previsto. Ahora, la maquinaria continúa acumulando polvo mientras la empresa busca más financiación. El caso de Range Fuels no es ni mucho menos el único. Empresas como Cilion o Ethanex Energy, entre otras, han abandonado la producción de biocombustibles debido a unos costes excesivos. A pesar de las esperanzas de científicos, empresarios y políticos, de las inversiones de cientos de millones de dólares y de décadas de esfuerzos concienzudos, la posibilidad de obtener un biocombustible que compita en precio y prestaciones con la gasolina continúa siendo una quimera.

El fracaso resulta especialmente desalentador. Hasta hace pocos años, los biocombustibles se consideraban la solución ideal a dos grandes problemas: la dependencia del petróleo y el cambio climático. El terrorismo y el encarecimiento del crudo habían convertido el petróleo de Oriente Medio en una preocupación creciente; al mismo tiempo, el calentamiento global acentuaba la necesidad de encontrar otros combustibles. En teoría, dado que las plantas absorben dióxido de carbono del aire, el empleo de combustibles de origen vegetal debería enlentecer la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

La afirmación de que los biocombustibles no han satisfecho las expectativas podría resultar chocante, en vista del rápido ascenso de la producción de etanol en EE.UU.: de 190 millones de litros en 1979, se ha pasado a casi 50.000 millones en 2010. Sin embargo, este crecimiento no obedece sino al mandato gubernamental de suministrar el 10 por ciento del combustible para el transporte de pasajeros, y solo se ha sostenido gracias a las cuantiosas subvenciones estatales. El ahorro neto en emisiones de dióxido de carbono que se consigue con el etanol —si es que se logra alguno— es mínimo. Y, por si fuera poco, la producción de esos 50.000 millones de litros consumió el 40 por ciento de la cosecha nacional de maíz (13 millones de hectáreas). En consecuencia, subieron los precios de los alimentos y se creó una enorme «zona muerta» en el golfo de México, donde el Mississippi vuelca todos los fertilizantes que absorben los campos de maíz del Medio Oeste.

Otros biocombustibles quizá careciesen de tales inconvenientes. En lugar de emplear el grano comestible, el etanol podría obtenerse a partir de la cáscara y el tallo del maíz, así como de algunas hierbas e incluso árboles, como pretendía Range Fuels. Para ello se utilizan las partes de la planta ricas en celulosa, las cuales no sirven de alimento ni para personas ni para el ganado, por lo que no afectaría al precio de la comida. Otra opción consistiría en producir combustibles líquidos a partir de algas, las cuales convierten con gran eficiencia el agua, el CO_2 y la luz solar en aceites aptos para la síntesis de hidrocarburos. Aún mejor, también podrían crearse microorganismos manipulados genéticamente que segregasen hidrocarburos.

Hoy por hoy, ninguna de las propuestas anteriores resulta viable desde un punto de vista económico. Según la Ley de Combustibles Renovables de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) estadounidense, en 2011 el país debería haber alcanzado

EN SÍNTESIS

Hoy por hoy, los biocombustibles no constituyen una opción energética rentable desde el punto de vista comercial. Las innovaciones requeridas se han mostrado mucho más difíciles de lo que se pensaba.

El etanol de maíz se produce en abundancia únicamente gracias a las subvenciones. Los biocombustibles de celulosa resultan caros y difíciles de obtener, no existen cultivos a gran escala de algas y la genética aún tendrá que avanzar mucho hasta que logre sintetizar microorganismos productores de hidrocarburos.

Algunas empresas han abandonado los biocombustibles y emplean ahora los mismos procedimientos para elaborar productos mucho más caros que el petróleo, como plásticos o cosméticos.



CARL DETORRES

una producción de 400 millones de litros de etanol de celulosa al año. El año pasado, la EPA rebajó ese objetivo hasta los 25 millones de litros; ahora tan siquiera se garantiza esa cifra.

La experiencia reciente parece indicar que los avances necesarios para hacer viable la producción de biocumbustibles quizá resulten más que difíciles. Aún más lejos queda la meta de los 136.000 millones de litros por año para 2022, establecida por el Gobierno de EE.UU. como posible solución a la dependencia energética y el cambio climático. Según Timothy Donohue, microbiólogo y director del Centro de Investigación Bioenergética de los Grandes Lagos en Madison, uno de los tres laboratorios del Departamento de Energía estadounidense que investiga en biocombustibles avanzados, se trata de un objetivo difícil: «El reto no es en absoluto menor que el de las células madre ni que el de cualquiera de los grandes proyectos científicos que haya acometido el país».

ETANOL DE MAIZ: INSUFICIENTE

Hasta ahora, el único biocombustible comercializado en EE.UU es el etanol. La razón obedece a las subvenciones estatales: según la Oficina de Gestión y Presupuestos de la Casa Blanca, en 2010 estas ascendieron a 5680 millones de dólares. El etanol se obtiene a partir del maíz por fermentación. Durante los últimos 9000 años, los humanos hemos perfeccionado el uso de enzimas y de levadura para fermentar los azúcares de los granos de maíz, de la caña de azúcar o de otras plantas. La producción estadounidense se ha disparado en el pasado decenio gracias a una densa infraestructura de molinos de maíz, tanques de fermentación y otros equipos que han brotado por todo el Medio Oeste como setas después de la lluvia.

Por desgracia, la eficiencia energética del etanol de maíz no es mucha. Se requieren grandes cantidades de energía para destilar el etanol de la mezcla de agua y levadura en la que ha fermentado, y esa energía suelen aportarla los combustibles fósiles. Después de tanto trabajo, un litro de etanol solo suministra al vehículo dos tercios de la energía de un litro de gasolina.

Puede que el etanol de maíz nunca logre competir con la gasolina si no goza de subvenciones. Además, su producción viene limitada por la cantidad de tierra fértil disponible. En octubre de 2010, el Servicio de Investigaciones del Congreso estadounidense señalaba que, aun si toda la cosecha de maíz del país en 2009 (año en que marcó un récord) se hubiese dedicado a la producción de etanol, solo habría reemplazado al 18 por ciento del consumo nacional de gasolina. Se concluyó, pues, que el fomento de la producción de etanol de maíz no conseguiría reforzar en grado apreciable la seguridad energética.

Se requiere mucha energía para destilar etanol. Por regla general, esa energía proviene de la quema de combustibles fósiles

J. Craig Venter, cofundador de Synthetic Genomics, la empresa que algún día podría convertirse en una fábrica de algas artificiales, apunta de manera más incisiva al problema de la escasez de tierra. Calcula que sustituir por etanol de maíz todo el combustible necesario para el transporte en EE.UU. exigiría cultivar un terreno tres veces mayor que el área continental del país.

CELULOSA: DESCOMPOSICIÓN DIFÍCIL

No hay duda de que destinar a la fabricación de combustible toda la producción nacional de maíz privaría de alimentos a personas y ganado. Por ello, el foco de interés científico y político se ha dirigido hacia el etanol de celulosa. Este no se obtiene del grano, rico en almidón, sino de los desechos de la planta, por lo que no repercutiría en la alimentación. Esa celulosa residual podría proporcionar enormes cantidades de energía. Según el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, la producción estadounidense de material rico en celulosa de maíz ascendería a 1400 millones de toneladas por año, el 80 por ciento de las cuales podrían convertirse en biocombustible. Eso reemplazaría al 30 por ciento del carburante destinado al transporte.

El problema principal consiste en descomponer las células de la planta para llegar hasta la celulosa. La pared celular contiene lignina, un compuesto que sostiene la pared y que impide a los animales digerir la madera. Luego viene la hemicelulosa, una larga fibra de azúcares que se adhiere al soporte de lignina y sirve de protección contra las enzimas. Solo después se llega al núcleo fibroso de celulosa: largas cadenas de moléculas de glucosa donde se encuentra la energía que se aprovechará en el combustible.

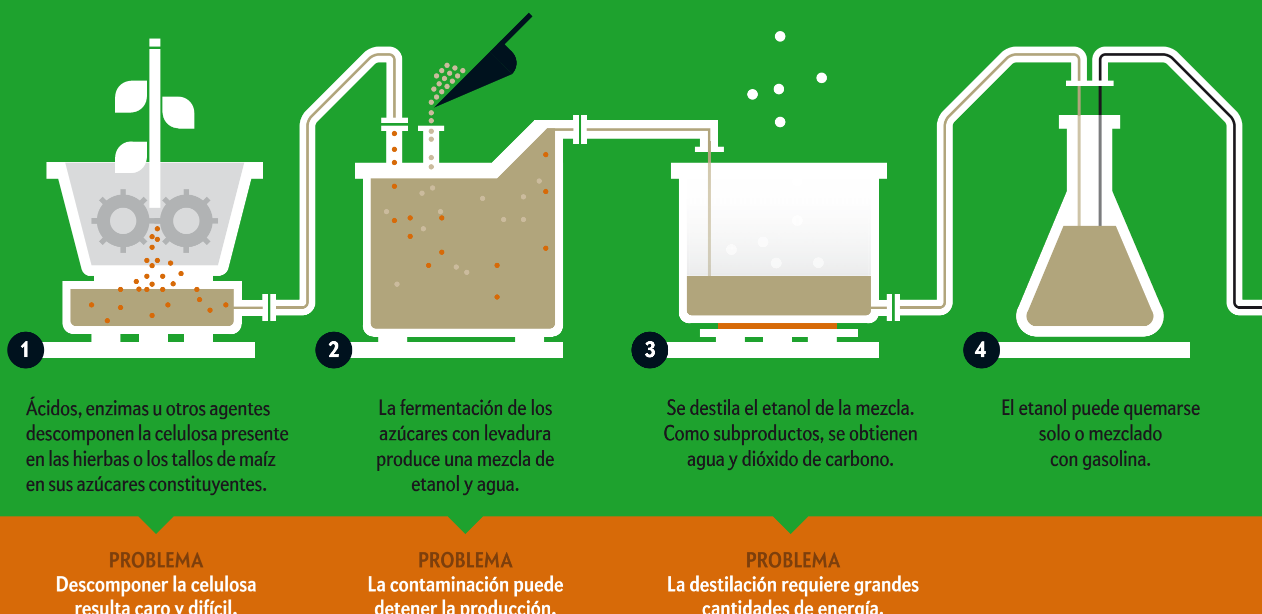
Las hormigas cortadoras de hojas han inspirado un método para superar las barreras orgánicas. En el Centro Bioenergético de los Grandes Lagos, estos insectos pululan en recipientes de plástico. Allí cavan pequeños hoyos donde cultivan los hongos encargados de procesar las hojas y convertirlas en aceites y aminoácidos, el verdadero alimento de los insectos. Para ello, ciertos microorganismos del tracto digestivo de las hormigas reducen primero las hojas a fragmentos minúsculos, que luego las hormigas obreras trasladan hasta los hoyos de compostaje. Otro conjunto de microbios segregado por las hormigas convierte esos fragmentos, con agua añadida, en gotas de lípidos. En esencia, las hormigas construyen un «intestino externo» que transforma la celulosa en combustible. Un modelo en miniatura para una fábrica. Lo que se propone el laboratorio es, según Donohue, utilizar esos mismos microorganismos, o bien aislar el material genético que codifica sus enzimas y utilizarlo en un proceso industrial para arrancar la pared celular.

Otra fuente de inspiración procede del ganado vacuno. Al masticar la hierba y lavarla en saliva, las vacas descomponen las células; después, en el tracto digestivo, un enjambre de microorganismos fermentan el bolo alimenticio y lo transforman en lípidos, los elementos grasos de los combustibles. Con el fin de emular la masticación de la vaca, los expertos han intentado reventar las paredes celulares con vapor o bañarlas en líquidos compuestos por moléculas dotadas de carga eléctrica. La compañía HCL Cleantech disuelve las plantas en ácido clorhídrico concentrado para acceder a la celulosa del interior de las células. Para mantener el proceso a bajo coste, recicla después el ácido.

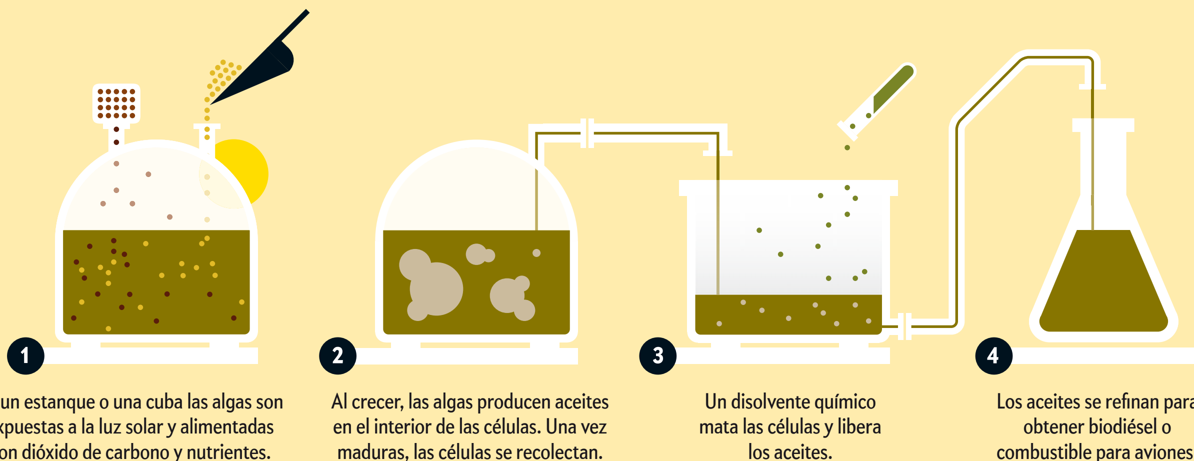
Otro procedimiento consiste en el uso de celulosas, una familia de enzimas a las que pertenece la que usan las termitas para hacer comestible la madera. Solo una de ellas se encuentra comercializada —la de la compañía danesa Novozymes— y cuesta unos 9 céntimos de euro por litro, más de 10 veces el precio de las enzimas utilizadas para la fermentación etílica tradicional. Cynthia Bryant, gerente para el desarrollo mundial de Novozymes, reconoce la necesidad de reducir los costes de la enzima para que la industria pueda echarse a andar. La empresa Codexis, radicada en California, intenta obtener una enzima más asequible a partir de una criba de miles de versiones naturales y combinarlas hasta conseguir una enzima híbrida que dé mejor resultado en la fábrica que en la naturaleza. Esta compañía también se dedica a la manipulación de los genes responsables de la creación de enzimas en las células, con la esperanza de producir una enzima aún mejor.

Sin embargo, aunque se logre dar con una enzima excelente, descomponer la celulosa lleva tiempo, puesto que la cadena de procesos biológicos implicados es lenta. En consecuencia, la producción en masa se prevé difícil. Pero ¿qué ocurriría si fueran los mismos cultivos, como el maíz o el pasto, los que produjesen las enzimas que descomponen la celulosa? Las enzimas permanecerían en las células a la espera de que el calor o algún otro agente industrial las liberase y la celulosa se degradaría en azúcares con rapidez y comodidad.

El gigante agroindustrial suizo Syngenta ha concebido un método para dotar a los granos de maíz de la capacidad para producir enzimas, a fin de que los propios granos puedan convertir el almidón en azúcar cuando se les someta a las condiciones adecuadas de temperatura, humedad y acidez. A pesar de las objeciones de ecologistas y fabricantes de alimentos, como la Asociación Norteamericana de Molineros, el Departamento de Agricultura de EE.UU. ha aprobado el proceso. Las semillas de Syngenta saldrán a la venta este año. Ello demuestra que pue-



ACEITE DE ALGAS



de obtenerse combustible a partir del maíz, pero no resuelve los problemas derivados de destinar la planta a la producción de combustibles en lugar de a la de alimentos. Por su parte, la empreasa Agrivida espera poder aplicar la técnica a la celulosa de los desechos de maíz o a la obtenida a partir de pastos cultivados expresamente para ese fin.

Pero puede que las enzimas autogeneradas no basten para obtener etanol de celulosa a un precio asequible. Como afirma Patrick R. Gruber, de la compañía biotécnica Gevo, el coste de los azúcares liberados no debería superar un tercio del de un barril de crudo, ya que después ha de añadirse el coste de refinar los azúcares para obtener combustible líquido. En conclusión, Gevo y otras empresas, como Virent, sostienen que los biocombustibles avanzados tan siquiera pueden competir con los precios más elevados de la gasolina. Todas esas compañías están perdiendo el interés por el etanol y se encuentran modificando sus procesos para convertir los azúcares —ya sean de celulosa o de caña de azúcar— en otros compuestos, como los precursores de los plásticos para botellas, cuyos precios actuales decuplican el de los combustibles fósiles.

Aun cuando el azúcar de la celulosa llegase a resultar competitivo, su empleo conllevaría un notable deterioro agrícola y ambiental. Los residuos de maíz suelen dejarse en el campo tras la recolección y, al descomponerse, actúan como abono. Empacar y sacar del lugar toda esa biomasa puede acelerar la degradación del suelo e impedir que admita nuevos cultivos. Expertos como Jeffrey Jacobs, vicepresidente del sector de hidrógeno y biocombustibles en Chevron Technology Ventures, estiman que, para no comprometer la seguridad del terreno, no podrían extraerse más de 80 millones de toneladas de material rico en celulosa de los campos de EE.UU. Una vez convertidas en etanol, no cubrirían más del 3 por ciento de la demanda nacional de gasolina.

En lugar de emplear residuos de maíz, algunas petroleras que buscan materias primas más baratas, como Royal Dutch Shell, invierten en etanol fermentado a partir de caña de azúcar, la cual proporciona más energía y cuyo cultivo resulta más sencillo. Tras 40 años de trabajo, Brasil cuenta con una infraestructura que produce al año unos 26.500 millones de litros de etanol de la caña de azúcar. Según explica Jeremy Shears, directivo de bioinnovación de Shell, la compañía ha formado, junto al fabricante brasileño Cosan, una empresa mixta llamada Raizen para producir 2200 millones de litros al año de dicho biocombustible. Sin embargo, un crecimiento tan acusado agravaría la destrucción de los hábitats naturales en Brasil y favorecería la deforestación de la selva amazónica. «La destrucción del planeta no vendrá de la mano de los biocombustibles obtenidos a partir de cultivos tradicionales, pues ahí todo el mundo parece aceptar que existen límites. El problema radica en los biocombustibles de celulosa», observa el experto agrónomo Timothy D. Searchinger, de la Universidad de Princeton. «Hablamos de un efecto descomunal sobre el uso de la tierra y la biodiversidad mundial.»

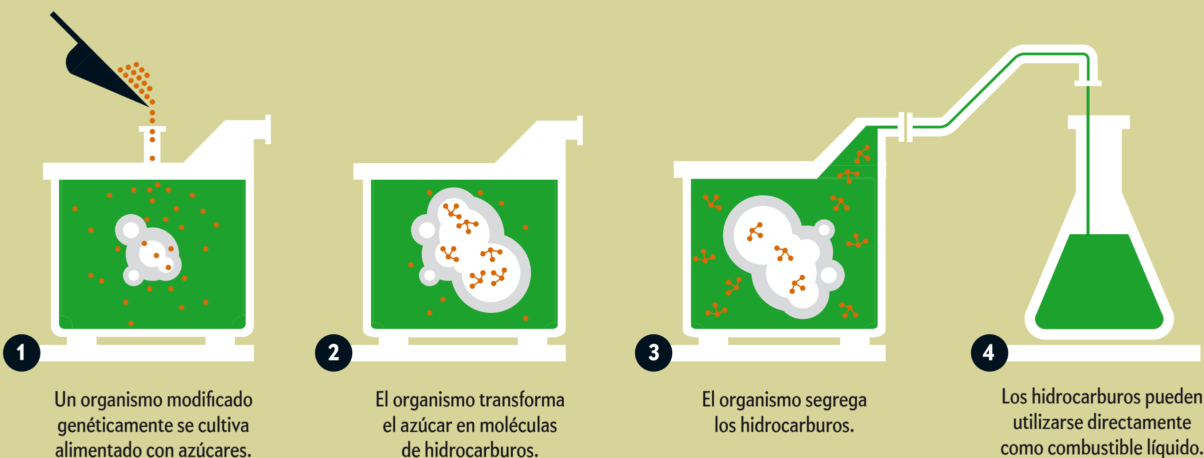
Aun cuando se descubriese una superenzima, la descomposición de la celulosa sería muy lenta debido al tiempo que necesitan las reacciones. Eso dificultaría la producción en masa

ALGAS: MUERTE O ASESINATO

Algunos han optado por considerar un organismo mucho más eficiente que las plantas a la hora de convertir la luz del sol en energía química: las algas microscópicas. Ciertas variedades aprovechan un tres por ciento de la radiación solar que reciben para fabricar materia vegetal; en cambio, el maíz o la caña de azúcar no pasan del uno por ciento. Gracias a la fotosíntesis, estos organismos fabrican las grasas que después pueden convertirse en combustible.

CARL DETORRES

HIDROCARBUROS DE ORGANISMOS SINTÉTICOS



PROBLEMA
Aún no se sabe bien qué genes habría que modificar. El azúcar es caro.

PROBLEMA
Manipular el organismo para que crezca con rapidez y produzca hidrocarburos a buen rendimiento es complicado.

PROBLEMA
Los hidrocarburos han de mantenerse por debajo de los niveles tóxicos y deben poder recogerse con facilidad.

CARL DETORRES

El cultivo de algas no necesita tierras de labor. Crecen hasta en el desierto, pueden regarse con agua salada e incluso con aguas residuales, por lo que no amenazan ningún cultivo destinado a la alimentación ni consumen recursos preciosos, como el agua dulce. La eficiencia del proceso promete hasta 40.000 litros de combustible por hectárea. Según Venter, para sustituir por aceite de algas todo el combustible dedicado al transporte en EE.UU. habría que explotar una extensión de unos 35.000 kilómetros cuadrados. En el caso del etanol de maíz, la superficie necesaria abarcaría el triple del área continental del país. «La diferencia es enorme», señala Venter. «Una solución es factible, la otra, simplemente absurda.»

Sapphire Energy es una de las empresas que investiga el cultivo de algas. Para ello, ha dispuesto una serie de estanques ovales a lo largo de nueve hectáreas de desierto en el estado de Nuevo México y proyecta una ampliación de 120 hectáreas. En su caso, sería la primera planta integrada de producción de algas en EE.UU. La compañía ha conseguido una subvención de 50 millones de dólares del Departamento de Agricultura y la garantía de un crédito de 54,5 millones por parte del Departamento de Energía. Las algas crecerían en un medio salino —los acuíferos que discurren bajo Nuevo México— y el aceite obtenido se enviaría a una refinería de Luisiana.

Pero la producción de biocombustibles a partir de algas tropieza con múltiples problemas. Si el crecimiento tiene lugar en estanques abiertos, ¿cómo evitar que los microorganismos sucumban a los predadores, las plagas o la contaminación de los microbios naturales? Y si las algas crecieran en biorreactores, ¿cómo justificar los gastos en equipo e impedir que las algas se adhieran a las superficies interiores? ¿Podrían costearse los nutrientes (nitrógeno y fósforo) necesarios para fomentar su crecimiento? Una vez criadas, ¿cómo separar las células maduras para extraer el aceite sin gastar tanta o más energía que la que este proporcionaría? Muy pocas empresas han obtenido cantidades útiles de aceite de algas. Beneficios, menos aún.

Quizás el reto más importante resida en el hecho de que las algas producen hidrocarburos como mecanismo de defensa contra largos períodos sin luz solar o sin nutrientes. Es decir, lo hacen bajo una situación de estrés biológico, durante la cual el organismo crece muy despacio. Habría que hallar algún método contra natura que impulsase a las células a responder al estrés pero que, al mismo tiempo, las hiciera crecer con rapidez.

Sapphire ha examinado 4000 variedades de algas y elegido 20 para intentar mejorarlas. Si todo marcha bien, la instalación ampliada fabricaría cerca de cuatro millones de litros de aceite de algas al año, los cuales podrían refinarse para obtener diésel o combustible para reactores. Las células muertas se reciclarían (volverían a utilizarse en el proceso a modo de nutrientes), en vez de comercializarse como alimento para ganado u otros productos. «Se trata de una biomasa cara y no podemos prescindir de ella», señala Tim Zenk, vicepresidente corporativo de Sapphire. «De tener que añadir una gran cantidad de nutrientes al proceso, sería imposible obtener beneficios.»

Por todo lo anterior, después de 18 años y tras un gasto de 25 millones de dólares, el Laboratorio de Energías Renovables de EE.UU. canceló en 1996 su programa de investigación sobre aceite de algas. Los expertos comprendieron que este jamás competiría con el crudo. Tras el cierre, se perdieron miles de variedades de algas caracterizadas. Las compañías que hoy rentabilizan la explotación de algas lo logran gracias a la producción de ácidos grasos como omega 3, que se vende como complemento alimenticio a un precio mucho mayor que el petróleo.

La única empresa que ha comercializado combustible de algas, Solazyme, lo hizo evitando la fotosíntesis. En 2010, la compañía entregó 76.000 litros a la Marina estadounidense. Si bien se trataba de un contrato que contemplaba la inversión en I+D, el monto total que recibió la empresa dividido por la cantidad de combustible arrojaba el resultado de 112 dólares por litro. Solazyme hace crecer las algas en el interior de cubas industriales similares a las utilizadas para la fermentación de insulina, pero las alimenta con azúcares en lugar de con luz solar y agua. Al igual que otras compañías, Solazyme se mantendrá en el mercado gracias a que fabrica productos más caros que

el combustible; también vende aceites para cosméticos y se ha asociado con Dow Chemicals para obtener productos químicos especiales, como fluidos aislantes.

ORGANISMOS SINTÉTICOS: INCIERTO

Los productores de combustible de algas persiguen modificar el código genético de estos organismos a fin de superar los obstáculos anteriores. Sin embargo, aún no han dado con la combinación adecuada. Venter recorrió los mares durante todo un año en busca de variedades ventajosas sin encontrar ninguna claramente superior. Como era presumible, no es fácil hallar un organismo mágico que lo arregle todo. Una solución, por tanto, sería quizá fabricarlo.

Los investigadores han decidido empezar por manipular los genes de otros microorganismos, en especial los de *Escherichia coli*. Jay D. Keasling, director del Instituto Mixto de Bioenergía del Departamento de Energía de EE.UU., ha transformado *E. coli* en una eficiente fábrica biológica que convierte radiación solar, CO_2 y agua en diferentes hidrocarburos; entre ellos, biodiésel. Con gran acierto, Keasling alteró la bacteria para que excretase el aceite, de manera que no hubiese que matarla para recogerlo. El aceite flota en lo alto de la cuba, de donde puede extraerse. La bacteria crece tres veces más deprisa que la levadura, prolifera en climas tropicales y exhibe una gran resistencia, ya que ha heredado la facultad de sobrevivir en las condiciones de anaerobia y toxicidad frecuentes en el tracto digestivo humano.

Se desconoce qué genes necesitan modificarse para producir un microorganismo sintético resistente, que sea barato de mantener y que produzca aceite en abundancia

También aquí serán los hidrocarburos el primer mercado —en caso de que lo haya— de estas fábricas biológicas. La empresa Amyris ha manipulado levaduras para fermentar azúcares y obtener farneseno, el cual puede comercializarse directamente o transformarse en otros productos, como la escualana, un emoliente empleado en cosméticos de lujo. Su director financiero, Jeryl I. Hilleman, explica que la compañía ha comenzado por lanzar productos de precio elevado para producir después otros más baratos, como diésel y combustibles. Amyris acaba de abrir en Brasil su primera factoría, anexa a una planta de fermentación de caña de azúcar.

Pero aunque se lograsen manipular organismos con gran acierto, puede que producir hidrocarburos que compitiesen con los combustibles fósiles resultase difícil. Venter sostiene que, a largo plazo, la solución consistirá en diseñar desde cero el código genético completo y controlar todos los parámetros. Su compañía ya ha creado una bacteria sintética que segregaba aceite, así como el primer organismo vivo cuyo código genético había sido sintetizado por completo. «Ahora estamos investigando miles de cepas y un gran número de modificaciones genéticas», explica Venter.

El enfoque anterior parece tan prometedor que ExxonMobil, el coloso de los combustibles fósiles, ha invertido 600 millones de dólares en la compañía de Venter. Pero los obstáculos principales tienen que ver con cuestiones de biología básica: hasta el genoma más pequeño posee cientos de genes misteriosos cuya función se desconoce. Los arquitectos de la biología como Venter pueden construir un genoma, pero se ignora qué genes hacen falta para obtener un microorganismo, resistente, rentable de mantener con vida y que produzca combustible en abundancia. Venter considera que el desafío supera al que supuso la secuenciación del genoma humano.

Incluso si alguien llegara a producir un organismo mágico, su viabilidad dependería de lo que costase alimentarlo. La fuente más económica en estos momentos es la caña de azúcar brasileña, empleada entre otros por Amyris y LS9, pero es aún demasiado cara para utilizarla como punto de partida para un biocombustible avanzado. Al igual que ocurre con las algas, las infecciones y otros accidentes pueden echar a perder las cubas de producción, un problema aún más agudo en el caso de los microorganismos especializados, mal adaptados para sobrevivir sin intervención humana. Y, desde luego, la producción en masa de biocombustibles resulta inevitablemente más lenta que el procesado del crudo.

El director técnico de Amyris, Neil Renninger, reconoce que en ningún caso lograrán reemplazar al petróleo: «El consumo de petróleo aumentará. Podríamos darnos por satisfechos si lográramos atender ese incremento en la demanda». Un objetivo semejante requeriría, además, un hidrocarburo que pudiese circular por los mismos oleoductos que se usan hoy, que admitiese ser tratado en las mismas refinerías y que fuese apto para los mismos motores.

¿EL SUEÑO DE UN LOCO?

A la vista de la situación, Renninger y otros expertos opinan que deberíamos rebajar nuestras expectativas. Toda la energía que podrían proporcionar los cultivos actuales —incluidos los que sirven de alimento al ganado, los árboles de las madereras y los de la industria del papel— se estima en unos 180 exajulios, alrededor de un tercio del consumo de energía mundial. Aumentar esa cifra tal vez resulte inviable en un futuro cercano e implicaría notables repercusiones sociales y ecológicas. Searchinger propone como meta más factible una producción equiparable al consumo mundial de combustible para la navegación aérea.

La búsqueda de biocombustibles más rentables continúa, por lo que siempre cabe esperar innovaciones. Pero inversores y políticos deberían proceder con tiento y no arriesgar demasiado en el empeño. Otra opción la proporcionaría el transporte eléctrico, pero, hasta que eso ocurra, el grueso de cualquier alternativa al petróleo seguirán siendo el maíz y la caña de azúcar. Ello incrementará la presión sobre la agricultura mundial, que ya se esfuerza en proporcionar alimento a siete mil millones de habitantes, así como pastos y fibras a innumerables cabezas de ganado. Como señala el ecólogo G. David Tilman, de la Universidad de Minnesota: «Es posible vivir con diferentes tipos de transporte. Pero no podemos vivir sin comer».

PARA SABER MÁS

Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry. Laboratorio Nacional de Oak Ridge, abril de 2005. **www.esd.ornl.gov/eess/final_billionton_vision_report2.pdf**
Growing pains: The posibilities and problems of biofuels. Christian Aid, agosto de 2009. **www.christianaid.org.uk/images/biofuels-report-09.pdf**
El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2010-11. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). **www.fao.org/publications/sofa/es**
Biofuels and the environment: The first triennial report to Congress. Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., enero de 2011.

FÍSICA

Los límites del conocimiento

Leonard Susskind, uno de los fundadores de la teoría de cuerdas, explica en esta entrevista que la realidad podría encontrarse más allá de nuestra capacidad de comprensión

Peter Byrne

Leonard Susskind, profesor de la Universidad Stanford, ha sido el padre de algunas de las ideas que han modificado el panorama de la física teórica durante los últimos años. En el decenio de 1970 fue uno de los precursores de la teoría de cuerdas, denostada al principio para convertirse después en la candidata más popular a unificar todas las interacciones de la naturaleza. Durante años, disputó la conjetura de Stephen Hawking de que los agujeros negros no solamente engullen objetos, sino que los deshacen hasta tornarlos del todo irreconocibles, en manifiesta violación de uno de los principios fundamentales de la mecánica cuántica. Con el tiempo, Hawking se desdijo. También contribuyó a desarrollar la noción moderna de universos paralelos a partir de lo que él denominó el «paisaje» de la teoría de cuerdas. Con ello, echó a perder el sueño de explicar el universo como el único resultado posible a partir de unas leyes fundamentales.

Hoy, los físicos que intentan comprender los aspectos más profundos de la realidad trabajan con una serie de esquemas que, en parte, se deben a Susskind. Pero, con el paso del tiempo, ha ocurrido algo curioso: Susskind se pregunta ahora si es posible comprender la realidad. Teme que esta se encuentre más allá de nuestra limitada capacidad para visualizarla.

Susskind no es el primero en expresar tal preocupación. En los años veinte y treinta del siglo xx, los fundadores de la mecánica cuántica se dividían en dos bandos: los realistas y los antirrealistas. Los primeros, entre quienes se contaba Albert Einstein, sostenían que el cometido de la física era proporcionar una imagen mental, por imperfecta que fuera, de una realidad externa y objetiva. Los antirrealistas, como Niels Bohr, afirmaban que esas imágenes mentales se encontraban repletas de atolladeros: los científicos deberían conformarse con realizar y verificar predicciones empíricas. Susskind opina que las contradicciones y paradojas de la física moderna ratifican las cautelas de Bohr.

Algo que condujo a Susskind a semejante conclusión fue el principio de complementariedad de los agujeros negros. Según esta idea, propuesta por él, existe una ambigüedad inherente en el destino de los objetos que se precipitan en un agujero negro. Desde el punto de vista del cuerpo que cae, este atraviesa sin mayores incidentes la frontera del agujero negro (el hori-

EN SÍNTESIS

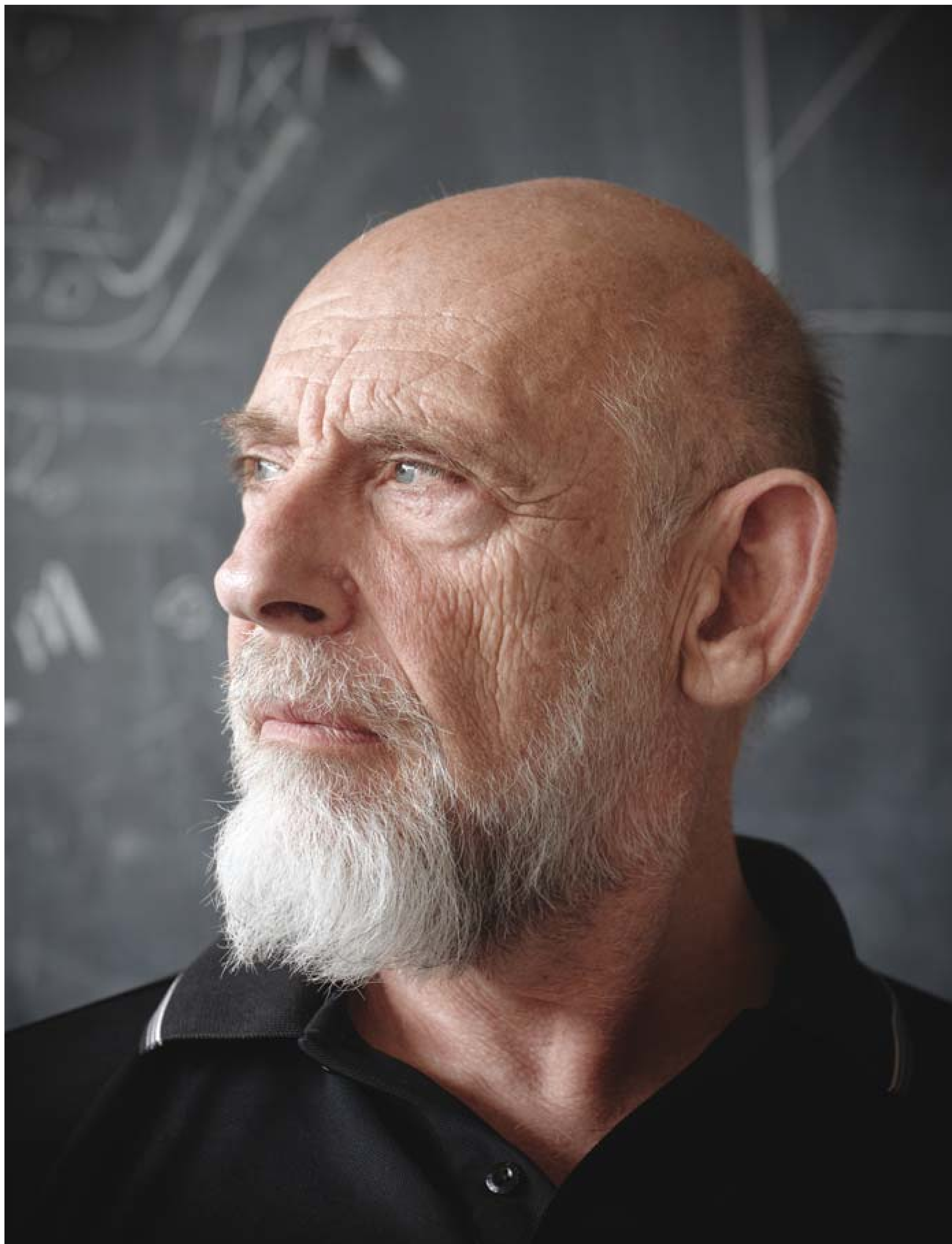
Leonard Susskind, de la Universidad Stanford, fue uno de los padres de la teoría de cuerdas. Ha destacado por desarrollar el principio de complementariedad de los agujeros negros y el principio holográfico.

Ambos postulados ponen de manifiesto una idea recurrente en teoría de cuerdas: a menudo, una misma realidad física admite varias descripciones duales, completamente diferentes entre sí.

Susskind fue también pionero en la formulación moderna del multiverso o «paisaje» de la teoría de cuerdas: la idea de que la teoría permite la existencia de un sinnúmero de universos.

En esta entrevista explica por qué todo lo anterior le lleva a concluir que quizá jamás lleguemos a comprender la realidad. El universo y sus leyes podrían no admitir una formulación única.

TIMOTHY ARCHIBALD



zonte de sucesos) y queda destruido al alcanzar la singularidad central. Para un observador externo, en cambio, el objeto que cae desaparece en el horizonte. ¿Qué ocurre en realidad? De acuerdo con el principio de complementariedad, la pregunta carece de sentido: ambas interpretaciones son válidas.

Una idea relacionada, que favorece también el antirrealismo, es el principio holográfico, propuesto a mediados de los años noventa por Susskind y por el premio nóbel Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht. Según él, lo que ocurre en cualquier volumen de espaciotiempo puede explicarse en términos de lo que sucede en el contorno (frontera) de ese volumen. Aunque solemos pensar en objetos que se mueven en un espacio tridimensional, tendríamos derecho a reinterpretar todo según una descripción equivalente formulada sobre una superficie bidimensional. ¿Qué es la realidad? ¿El contorno o el interior? La teoría no se pronuncia al respecto. La realidad, según la conjetura holográfica, depende de la perspectiva.

¿Cómo acaba el hijo de un fontanero del Bronx cuestionando la naturaleza de la realidad?

En el bachillerato fui un mal estudiante. Las matemáticas se me daban muy bien, pero era un chico problemático y me metí en montones de líos. El resultado de aquello fue que no se me permitió estudiar física; me dijeron que debía cursar el módulo automoción. Una vez en la universidad, que era una escuela de ingeniería, recibí mi primer curso de física. Yo era mucho mejor que el resto, incluido el profesor. Por fortuna, que yo lograse hacer las cosas que él no podía no fue motivo de zozobra entre nosotros. Entonces uno de los profesores me dijo que no me veía con madera de ingeniero. Lo cual era cierto. Le pregunté: «¿Qué debería hacer?», a lo que repuso: «Mira, eres excepcionalmente listo. Deberías ser científico».

¿Cursó alguna asignatura de filosofía?

Sí, en la universidad. Quedé bastante fascinado por algunos conceptos, pero mi interés se desvaneció cuando la física acabó por engancharme.

¿Y existe algún filósofo de la ciencia que sea de su agrado?

Soy uno de los pocos físicos que conozco a quien le gusta Thomas Kuhn. Era en parte historiador de la ciencia y en parte sociólogo. Entendió bien la idea básica que se esconde tras los cambios de paradigmas científicos. De repente, tiene lugar un cambio radical en la perspectiva; ideas, abstracciones, imágenes y conceptos completamente nuevos se tornan relevantes. La relatividad supuso un gran cambio de paradigma, al igual que la mecánica cuántica. Y hoy seguimos inventando nuevos realismos. Nunca reemplazan del todo a las ideas antiguas, pero lo hacen en gran medida gracias a conceptos que funcionan mejor, que describen mejor la naturaleza, que a menudo no nos resultan familiares y que hacen que la gente se pregunte lo que significa «la realidad». Hasta que llegan otros y vuelven a poner todo patas arriba. Y nunca deja de sorprendernos que la antigua manera de pensar, el entramado o el armazón matemático que hubiéramos creado, falle así, por las buenas.

Y en medio de todo este remozado, ¿queda sitio para un concepto como el de realidad objetiva?

Hasta cierto punto, todo físico debe poseer una noción de que en el mundo existen cosas objetivas y de que nuestra tarea consiste en ir y averiguar lo que son. No creo que ello pueda lograrse sin una idea de realidad objetiva. La prueba de la objetividad es que los experimentos son reproducibles. Si le das una patada a una piedra, te harás daño en el pie. Y si le das otra patada, volverá a dolerte. Si repetimos el experimento una y otra vez, reproduciremos los mismos efectos.

Dicho esto, los físicos casi nunca hablan de la realidad. El problema reside en que lo que la gente suele querer decir cuando habla de «realidad» guarda más relación con la biología y la evolución, con lo que llevamos grabado en nuestro cerebro y con nuestra arquitectura neuronal, que con la física en sí. Somos prisioneros de nuestra propia arquitectura neuronal. Podemos visualizar algunas cosas, pero hay otras que no podemos imaginar.

La geometría abstracta de cuatro dimensiones que propugnó Einstein resultaba difícil de imaginar de manera concreta. Se logró visualizar a través de relaciones matemáticas. Cuando de pronto apareció la relatividad, mucha gente debió pensar: ¿qué ha ocurrido con el tiempo «real»? ¿Qué le ha sucedido al espacio «real»? Todo quedó enmarañado en un producto extraño. Pero había reglas. El quid de la cuestión era que había reglas matemáticas claras y precisas que, una vez destiladas del conjunto, sobrevivieron. Y las antiguas nociones de realidad desaparecieron.

Por eso propongo dejar de lado la palabra «realidad». Intentemos hablar sin emplear ese término. Estorba e introduce conceptos que rara vez son de ayuda. La palabra «reproducible» resulta mucho más útil que la palabra «real».

¿Y qué hay de la mecánica cuántica? La teoría predice que dar un puntapié dos veces a la misma piedra y de la misma manera puede producir dos resultados diferentes.

Asombroso, ¿verdad? La mecánica cuántica trajo consigo dos descubrimientos que dejaron patas arriba nuestra percepción clásica de la realidad. Uno fue el entrelazamiento. Lo que se deriva de este fenómeno es algo muy extraño: que podemos conocer todas las propiedades de un sistema compuesto y, aun así, no saberlo todo acerca de sus partes constituyentes. Es un buen ejemplo del hecho de que, desde un punto de vista biológico, no nos hallamos bien dotados para la abstracción. Un ejemplo que subvierte nuestro sentido de la realidad [*véase* «Vivir en un mundo cuántico», por Vlatko Vedral; Investigación y Ciencia, agosto de 2011].

La otra andanada contra la idea clásica de realidad fue el principio de incertidumbre de Heisenberg. Si nos empeñamos en describir una partícula como un sistema dotado de posición y momento, nos veremos en dificultades. Deberíamos intentar imaginarla como algo con posición *o* con momento cinético; pero no con ambos a la vez.

¿Es eso lo que los físicos denominan «complementariedad»?

Exacto. Sucede que la descripción matemática del horizonte de sucesos de un agujero negro se parece mucho a la del principio de incertidumbre. Una vez más, se trata de un dilema de «o» frente a «y». Desde un punto de vista clásico, un cuerpo cae en un agujero negro o no lo hace. Hay objetos fuera del agujero negro y objetos dentro de él. Lo que hemos aprendido es que esa manera de pensar resulta incorrecta. No debemos imaginar que algunas cosas ocurren fuera del horizonte de sucesos y que otras acontecen en el interior. Ambos puntos de vista constituyen descripciones redundantes de un mismo fenómeno. O bien elegimos una, o bien la otra. Ello implica que debemos desechar la vieja idea de que un bit de información se encuentra en un lugar determinado [*véase* «Los agujeros negros y la paradoja de

la información», por Leonard Susskind; Investigación y Ciencia, junio de 1997].

Si lo entiendo bien, el principio holográfico extiende el modelo de complementariedad de un agujero negro a todo el universo.

Así es. Suponga que deseamos describir cierto sistema con una minuciosidad extraordinaria. Para escudriñar un sistema con gran precisión, se necesita siempre una elevada cantidad de energía. Por tanto, llegará un punto a partir del cual, si intentamos ser más precisos, comenzarán a crearse agujeros negros. Toda la información que contiene un agujero negro se encuentra en su superficie. Así, cuando intentamos hacer una descripción muy refinada de un sistema, resulta que estamos colocando la información en su frontera.

Existen dos descripciones de la realidad: o bien la realidad es todo el espaciotiempo rodeado por su frontera, o bien es la superficie que define dicha frontera. Podemos imaginar un objeto como tal, inmerso en el seno del espacio, o bien como un amasijo de información compleja y entreverada sobre la frontera que envuelve a ese espacio. Podemos proceder de una manera o de la otra, pero no de ambas a la vez. Pasar de una descripción a la otra es algo tremendamente enrevesado.



Los agujeros negros ponen de manifiesto nuestros límites para comprender el universo.

La meta original de la teoría de cuerdas consistía en proporcionar una explicación única de la realidad. Ahora, nos ofrece múltiples universos. ¿Qué ha ocurrido?

Una buena parte de la comunidad de físicos ha abandonado la pretensión de explicar nuestro universo como si fuera el único mundo posible desde un punto de vista matemático. Hoy en día, el multiverso es lo único que nos queda. No todo el mundo trabaja en ese campo, pero no existe ningún argumento coherente e incisivo contra él.

En 1974 viví una experiencia interesante sobre la manera en que se alcanza el consenso científico. En aquella época la gente estaba trabajando en cromodinámica cuántica (QCD), que por entonces era una teoría aún sin verificar sobre los hadrones [partículas subatómicas como los protones o los neutrones]. En un congreso, pregunté a los participantes sobre qué probabilidad asignaban a la cromodinámica cuántica de resultar correcta. Nadie le otorgaba más del 5 por ciento. Pero, al preguntar en qué estaban trabajando, las respuestas fueron: QCD, QCD, QCD. Todo el mundo se dedicaba a la cromodinámica cuántica. El consenso se había alcanzado, pero, por alguna misteriosa razón, la gente mostraba su lado más escéptico. Querían aparentar rectitud. Hoy ocurre algo así con la teoría del multiverso. Un gran número de físicos se niega a dar su brazo a torcer y no quiere admitir que carecemos de alternativas.

El universo es enorme. Sabemos de manera empírica que su volumen es al menos 1000 veces mayor que la parte que podemos ver. El éxito de la inflación cósmica abre la posibilidad de que, a escalas lo bastante grandes, el universo sea muy variado [*véase* «La inflación a debate», por P. Steinhardt, Investigación y Ciencia, junio de 2011]. Y la teoría de cuerdas nos proporciona las piezas de un mecano que podemos armar en un número descomunal de maneras diferentes. Así que no hay razón para preguntarnos por qué nuestro pequeño trozo de universo es como es, porque existen otras partes del cosmos que no son como la nuestra. No puede haber una explicación universal de todo lo que existe, de la misma manera que tampoco puede haber un teorema que afirme que la temperatura media de un planeta ha de ascender a 20 grados centígrados. Sería absurdo intentar demostrar un teorema semejante, porque hay un sinnúmero de planetas con otra temperatura.

Pero, en el caso del multiverso, nadie conoce las reglas subyacentes. El multiverso es una imagen mental que nadie sabe cómo emplear para hacer predicciones. El proceso de inflación eterna produce burbuja tras burbuja tras burbuja, un número infinito de cada tipo posible. Eso significa que la probabilidad de que exista cierto tipo de universo frente a otro es infinito dividido por infinito. Nos gustaría disponer de una distribución de probabilidades que implicase que algunos universos son más plausibles que otros, para poder así realizar alguna predicción. Al final, hemos partido de lo que parecía una imagen muy convincente y hemos acabado intentando medir una infinidad de probabilidades, lo que resulta absurdo. Si todo fracasa, será por culpa de eso.

¿Es posible hacer física teórica sin cavilaciones filosóficas?

La mayor parte de los grandes físicos siempre han mostrado una profusa veta filosófica. Mi amigo Dick Feynman aborrecía la filosofía y a los filósofos. Pero en el fondo —yo le conocía bien— tenía una faceta filosófica muy profunda. Los problemas sobre los que uno decide reflexionar se hallan condicionados por sus predisposiciones filosóficas. Pero también creo que, en ocasiones, aparecen sorpresas que dan la vuelta a todos tus prejuicios filosóficos. La gente piensa que, en ciencia, las reglas son fijas e inmutables: se realizan experimentos, se obtienen resultados, se interpretan y, al final, algo emerge de todo ello. Pero el proceso real de la ciencia es tan humano, caótico y controvertido como cualquier otro.

Peter Byrne *es autor de «Los muchos mundos de Hugh Everett», que apareció publicado en Investigación y Ciencia en febrero de 2008 y que dio lugar al libro* The many worlds of Hugh Everett III: Multiple universes, mutual assured destruction and the meltdown of a nuclear family *(Oxford University Press, 2010).*

PARA SABER MÁS

El paisaje cósmico: Teoría de cuerdas y el mito del diseño inteligente. Leonard Susskind. Editorial Crítica, 2007.
Adiós a la razón. Paul Feyerabend. Editorial Tecnos, 2008.
La guerra de los agujeros negros: Una controversia científica sobre las leyes últimas de la naturaleza. Leonard Susskind. Editorial Crítica, 2009.

DON DIXON

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburg-Essen.

De visita en el país de Liliput

Gulliver no pasó tanta hambre como creían los liliputienses. Algunas falacias relacionadas con los cambios de escala

Cuando Gulliver naufragó y llegó a la isla de Liliput, sus habitantes lo ataron al suelo. Fue una medida de precaución, pues ellos no medían más de seis pulgadas, la duodécima parte de la altura de un humano. Como no deseaban ver morir de hambre a su preso, decidieron llevarle algunas raciones de comida. Pero ¿cuántas?

Para un alargamiento a escala en una proporción de 1 a 12, el volumen se multiplica por $12^3 = 1728$, lo que implica que un humano debería pesar unas 1728 veces más que un habitante de Liliput. Podríamos suponer, por lo tanto, que Gulliver necesitaba ingerir 1728 raciones liliputienses. De hecho, en la novela satírica de Jonathan Swift, el emperador decide proporcionar al prisionero una cantidad de comida equivalente a la de 1724 de sus súbditos. A continuación veremos que a Gulliver bien le hubieran bastado 270 raciones para quedar satisfecho.

En primer lugar, cabe preguntarse la razón por la que necesitamos alimentarnos. «Para que crezcas sano y fuerte», explican los padres a sus hijos. Pero eso no supone sino una parte de la verdad, ya que un adulto no come mucho menos que un niño. Como sabemos, los nutrientes que ingerimos reaccionan con el oxígeno del aire para producir energía. En el caso de un adulto que no realice trabajos corporales demasiado exigentes, la potencia generada ronda un vatio por kilogramo de masa corporal.

¿En qué empleamos esa energía? La no tan refinada expresión «fiambre» para referirse a un cadáver nos da una pista: los mamíferos y las aves la usamos para mantener nuestro organismo —en particular, nuestro cerebro— a una temperatura determinada. A dicha temperatura óptima, nuestras conexiones nerviosas pueden operar con rapidez, pero las proteínas no se desnaturalizan.

Cuando el hombre carecía de máquinas, el trabajo físico que una persona debía realizar en su vida cotidiana resultaba aproximadamente igual al metabolismo basal. Como consecuencia, los individuos que realizaban tareas físicas duras debían añadir mucha más guarnición a sus platos para quedar satisfechos. Sin embargo, hoy en día podemos afirmar que, en esencia, comemos y respiramos para compensar la pérdida de calor. A una

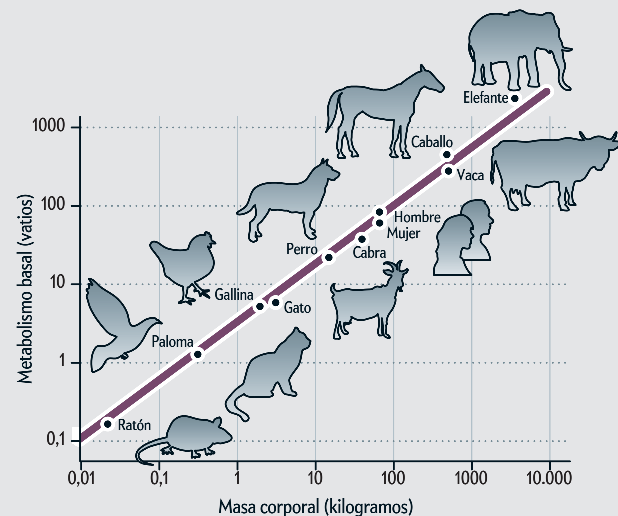
Prisionero empachado: Dado que Gulliver era 12 veces más alto que los habitantes de Liliput, estos decidieron alimentarle con unas 12^3 raciones liliputienses, pues estimaron que la cantidad de comida que ha de ingerir un ser vivo debía aumentar de manera proporcional a su masa. En realidad, a Gulliver le habrían bastado unas 270 raciones para no pasar hambre.

EMDE-GRAFIK, *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

Para cambios de escala que conservan las proporciones, las superficies y los volúmenes se comportan como las potencias al cuadrado y al cubo de las longitudes, respectivamente. La densidad media del cuerpo de la mayoría de los seres vivos es aproximadamente igual a la del agua; por ello, la relación entre sus masas puede asemejarse a la que guardan sus volúmenes.

La energía que un músculo aplica en una contracción (el trabajo que realiza) es igual a la fuerza que ejerce multiplicada por el recorrido. La fuerza resulta proporcional a la superficie transversal del músculo, mientras que el recorrido (de contracción) es proporcional a la longitud. La energía puesta en acción por el músculo en cada ciclo de trabajo es, por tanto, proporcional a su volumen.

Si, con independencia de su tamaño, todos los animales exhibiesen un metabolismo y fisiología similares, el calor producido por los músculos, así como aquel liberado por la actividad de los órganos internos, sería proporcional a su volumen. Sin embargo, ese no es el caso. La ley empírica de Max Kleiber relaciona el metabolismo basal con la masa corporal. En una escala logarítmica para ambas magnitudes, la gran mayoría de los animales de sangre caliente se distribuye a lo largo de una recta de pendiente 3/4 (*derecha*). En otras palabras, el metabolismo basal y la masa corporal se relacionan mediante una ley de potencias con un exponente igual a 3/4. Dicho valor puede explicarse a partir de argumentos basados en el flujo sanguíneo y la estructura fractal de los vasos capilares.



diferencia de temperatura dada, dicha pérdida resulta proporcional a nuestra superficie corporal. En el caso de Gulliver, su superficie debía ser unas $12^2 = 144$ veces mayor que la de un liliputiense, por lo que, según lo anterior, le hubieran bastado 144 raciones de comida.

No obstante, la realidad se muestra algo más compleja. Los seres vivos que disponen de mecanismos para la regulación de la temperatura corporal (mamíferos y aves) exhiben todo un abanico de tamaños: desde animales cuya masa no llega a los 2 gramos, como el murciélago moscardón, hasta seres que superan las 130 toneladas, como la ballena azul; una diferencia que abarca ocho órdenes de magnitud. El consumo diario de energía no solo depende de la superficie corporal, sino también de la temperatura del entorno y de otras características, como el pelaje, una constitución compacta o de miembros delgados, la existencia de órganos de refrigeración como la lengua de los perros o las orejas de los elefantes, etcétera.

La combinación de todos estos factores da como resultado una regularidad asombrosa: si representamos en un diagrama de doble escala logarítmica el metabolismo basal frente a la masa corporal, veremos que la mayoría de los animales de sangre caliente se distribuyen con gran precisión a lo largo de una recta de pendiente 3/4. En otras palabras, al gasto de energía en función de la masa le corresponde una ley de potencias con un exponente de 3/4. Si aplicamos esta ley al caso de Gulliver —teniendo en cuenta que su masa era 12^3 veces la de un liliputiense—, obtendremos que al náufrago le habrían bastado $(12^3)^{3/4} \approx 268$ raciones liliputienses para sobrevivir.

¿Por qué un exponente de 3/4? Puede demostrarse que, si el enfriamiento a través de la superficie fuese el único factor decisivo, el exponente tomaría el valor de 2/3. Por otro lado, si el consumo fuese proporcional a la masa (como habían supuesto los ingenuos habitantes de Liliput), el exponente sería la unidad. Como vemos, la función real se halla entre ambos límites, si bien más cercana a la suposición en la que el factor dominante se debe a la pérdida de calor a través de la superficie. Esta ley empírica debe su nombre al biólogo suizo Max Kleiber, quien la enunció en los años treinta del siglo pasado. Para explicar el valor del exponente alométrico 3/4, existen diferentes argumentos teóricos, los cuales se basan, sobre todo, en las características del flujo sanguíneo y en la geometría fractal de los vasos capilares.

El hecho de que exista un tamaño mínimo para los animales de sangre caliente (mamíferos y aves) se debe a que la cantidad de alimento que se ingiere de una vez no puede exceder la masa corporal. De hecho, las aves más pequeñas (los elfos de las abejas, un tipo de colibrí) y el mamífero de menor tamaño (el murciélago moscardón) no difieren mucho en su peso, que apenas llega a los dos gramos.

Por último, haremos notar que fue una suerte que los liliputienses solo dispusieran de una pequeña reserva de vino. Si, antes de transportarlo a la capital, hubieran suministrado a Gulliver tanta bebida como ellos creían necesaria, probablemente hubieran acabado con su vida. De hecho, así ocurre con los animales de gran tamaño, como los elefantes, cuando se les administran sedantes de manera proporcional a su masa corporal y no a la cantidad de alimentos que consumen.

Fuerte como una hormiga

Existen numerosos dichos sobre animales, casi todos ellos incorrectos y basados en observaciones o comparaciones erróneas. Basta con pensar en la estrategia del avestruz, en los lemmings hastiados de la vida, en los perros que solo ladran pero no muerden, o en los canarios saciados con una pequeña cantidad de alpiste. Tanto los escritores de fábulas como los primeros zoólogos se han servido en ocasiones de supuestas expresiones faciales para adjudicarles rasgos de carácter (como el delfín que sonríe con amabilidad) del todo infundados. Existe, no obstante, un refrán certero: en la oscuridad todos los gatos son pardos... al menos para el hombre.

Las hormigas son consideradas muy trabajadoras y, también, muy fuertes. Tanto es así que, en ocasiones, sirven como respuesta pretendidamente seria a la pregunta sobre cuál es el animal que posee una mayor fuerza física. Semejante malen-

tendido tiene su origen en el hecho de que algunas hormigas pueden transportar hasta cincuenta veces su peso, algo con lo que los humanos tan siquiera podemos soñar. Pero un clip de oficina soporta mucho más: haga la prueba en casa. Y, de niños, no experimentábamos mayores problemas para montar a caballito a nuestros compañeros del mismo tamaño que nosotros, algo que un adulto solo puede lograr con facilidad si se encuentra en buena forma física.

En libros y programas de televisión de cierto prestigio —por desgracia, también en algunos para niños— podemos encontrar afirmaciones del estilo: «Si una hormiga tuviese el tamaño de una persona, podría cargar a sus espaldas un camión». ¿Es cierto? Cuando hablamos de sostener y levantar un peso, nos referimos en realidad a la fuerza muscular. Si pensamos en una hormiga cuya longitud se haya multiplicado por 100, su masa muscular habrá aumentado en un millón. Pero la fuerza que puede ejercer un músculo es proporcional a su sección transversal, la cual ha aumentado en un factor 10.000. Por lo tanto, nuestra hormiga gigante podría transportar, en lugar de 50, 500.000 hormigas normales. Pero, si deseara levantar a hormigas de su mismo tamaño, no podría más que con media, puesto que su peso asciende ahora al de un millón de hormigas.

Otra falacia habitual se refiere a la velocidad de estos animales. Es cierto que una velocidad de cuatro kilómetros por hora resulta más que considerable para un insecto que mide solo algunos milímetros. Pero no por ello deja de ser absurdo calificar la hormiga del desierto como «el animal más veloz del mundo»: si expresásemos todas las velocidades en longitudes corporales por segundo, obtendríamos una gran cantidad de resultados carentes de sentido. En tales unidades, una persona a la carrera sería más veloz que un tren, pues este es 100 veces más largo que una persona, pero de ninguna manera 100 veces más rápido. O, con un razonamiento similar, la velocidad de dos trenes idénticos acoplados debería doblar la de uno solo.

Desde un punto de vista científico, deberíamos de ser capaces de apreciar que las hormigas son seres asombrosos sin necesidad de recurrir a afirmaciones falsas como las anteriores. Asimismo, también los grillos (con fama de vagos) y los perezosos (realmente lentos) son dignos de admiración. Lo mismo podríamos concluir de todas las especies que, gracias a la evolución, han logrado evitar su extinción hasta el día de hoy.

Pulgas sobrenaturales

Otro animal increíble, víctima también de un error de cálculo, es la pulga ficticia de un metro de tamaño que saltaría por encima de la torre Eiffel. En principio, una pulga cien veces más alta contaría a su favor con una masa muscular un millón de veces mayor, la cual podría emplear en aumentar la potencia del salto. Pero, en realidad, no se elevaría mucho más que sus pequeños compañeros de especie, ya que también su masa se habría multiplicado por un millón. El salto no pasaría de unos pocos decímetros, algo que tampoco al ser humano le cuesta lograr. Más allá de esta estimación, la única ventaja de la que se beneficiaría nuestra pulga gigante sería que el efecto de frenado debido a la fricción del aire sería mucho menor... si bien por esa misma razón su caída no sería tan suave.

Vemos, pues, que los insectos gigantes no supondrían para los humanos una competencia insuperable en el ámbito deportivo. Llegados aquí, podemos preguntarnos por qué no existen artrópodos de nuestro tamaño, sino tan solo vertebrados. La razón se debe a la eficiencia que unas dimensiones tales exigen de los sistemas circulatorio y respiratorio: los nuestros no se basan en la difusión, sino que emplean de manera considerable la hidráulica. Algo en lo que las jirafas, debido a su gran altura, destacan sobremanera.

Según las estimaciones anteriores sobre la potencia de salto, todos los animales deberían alcanzar alturas similares (siempre y cuando nos restrinjamos al salto en sí y obviemos el efecto de frenado del aire sobre los más pequeños). Podemos comprobar que, de hecho, casi todos los mamíferos poseen una capacidad de salto que ronda el metro: caballos, perros, ratas canguro, etcétera. Lo mismo se aplica, aunque en menor medida, a los insectos como las pulgas. En cuanto al hombre, el récord mundial en salto de altura se encuentra en 2,45 metros. No obstante, desde un punto de vista físico, solo hemos de considerar la elevación del centro de gravedad, la cual es algo menor, puesto que el atleta parte de una posición erguida, no tumbada. Además, las condiciones de la competición estipulan que todas las partes del cuerpo —si es necesario, una tras otra— han de pasar por encima del listón, pero ello no implica que lo haga el centro de gravedad.

Si, como es el caso del salto con pértiga, almacenamos la energía cinética de la carrera en la energía elástica de la pértiga y la empleamos después para saltar, podremos conseguir una elevación del centro de gravedad de unos cinco metros. La energía potencial asociada a dicha elevación se aproxima bastante a la energía cinética del velocista, como demuestra un cálculo sencillo. En el salto de altura normal, por el contrario, no nos elevamos mucho más que cuando lo hacemos sin tomar carrera. La razón reside en que, a diferencia de los canguros, carecemos de unos tendones de Aquiles que nos permitan almacenar energía.



La musaraña *Suncus etruscus*, con unos 2,5 gramos de peso, era hasta 1974 el mamífero más ligero conocido. Existe una masa corporal mínima para los animales de sangre caliente, la cual ronda los dos gramos.

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

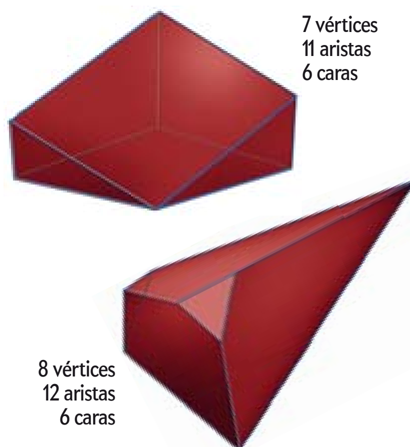


¿Qué es un poliedro?

Cómo obtener una definición y un teorema a partir de una conjetura

En una carta de 1750 dirigida a Christian Goldbach, Leonhard Euler conjeturaba que el número de vértices de un poliedro menos el número de aristas más el número de caras debería ser siempre 2. En símbolos: $V - A + C = 2$. No resulta difícil comprobar que lo anterior se cumple para los poliedros regulares que Euclides discute en el último libro de sus *Elementos*.

Puede parecer sorprendente que los cinco poliedros regulares satisfagan la ecuación propuesta por Euler. Sin embargo, esta resulta aún más general. Usted mismo podrá comprobar que se cumple también para los siguientes poliedros irregulares:



Llegados a este punto, parece que deberíamos preguntarnos si la conjetura se satisface para todos los poliedros, sin excepción. Desde luego, que aún no hayamos encontrado ningún contraejemplo no basta para elevar la conjetura a la categoría de verdad universal. Para ello, necesitaríamos una demostración.

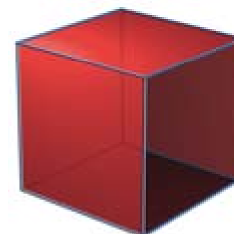
El problema reside en que ni Euclides ni el propio Euler disponían de una definición precisa de *poliedro*. Todos los poliedros tradicionales poseen caras, aristas y vértices, pero ninguno de estos dos grandes matemáticos contaba con una descripción exacta de las relaciones que deberían existir entre estos elementos.

No deja de resultar curioso que la ausencia de una definición no supusiese un obstáculo para que matemáticos como Cauchy «demostraran» la conjetura de Euler. Existe, de hecho, un gran número de argumentos que parecen probar un resultado parecido. David Eppstein, de la Universidad de California en Irvine, ha detallado hasta diecisiete demostraciones diferentes. Un gran número de ellas emplea un método de inducción sobre el número de vértices, aristas o caras, pero no todas resultan tan intuitivas como el argumento de Cauchy.

El argumento de Cauchy fue discutido en detalle por Imre Lakatos, filósofo de la ciencia que durante los años setenta se interesó en ilustrar la manera en que la metodología de la matemática evolucionaba por medio de pruebas y refutaciones. Merece la pena repasar el argumento de Cauchy y ver qué podemos concluir a partir de él.

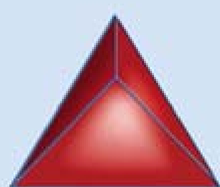
El argumento de Cauchy

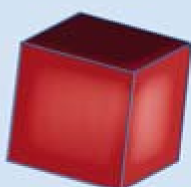
Tomemos un poliedro (piense en cualquiera de los anteriores) y eliminemos una de sus caras. Al suprimir una cara, el número de vértices y el de aristas permanece constante, por lo que demostrar la conjetura de Euler equivale a probar que, si en un poliedro suprimimos una cara, siempre se cumple que $V - A + C = 1$. Aunque el procedimiento de Cauchy pretende ser general, aquí ilustraremos el caso particular del cubo:

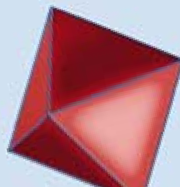


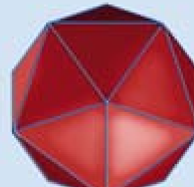
Después de eliminar una de las caras del cubo, proyecte la figura resultante sobre un plano. Si lo desea, puede imaginar que el cubo se encuentra hecho de un

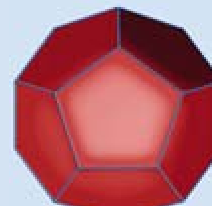
Los cinco poliedros regulares considerados por Euclides en el último libro de sus *Elementos*, también denominados sólidos platónicos. Todos ellos satisfacen la conjetura de Euler: $V - A + C = 2$.





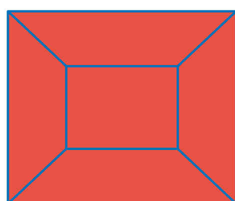




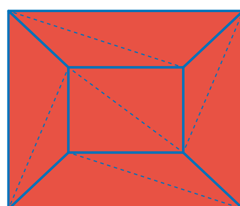


TODAS LAS ILUSTRACIONES: *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, SEGÚN EL AUTOR

material elástico que le permite estirarlo sobre la mesa:

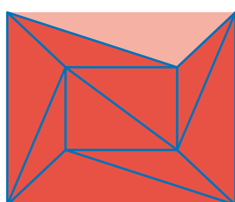


El siguiente paso consiste en *triangular* cada una de las caras. Para ello, trazaremos diagonales que unan vértices no consecutivos. El objetivo consiste en descomponer cada una de las caras en una unión de triángulos. En este caso, el resultado es el siguiente:

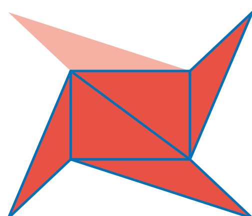


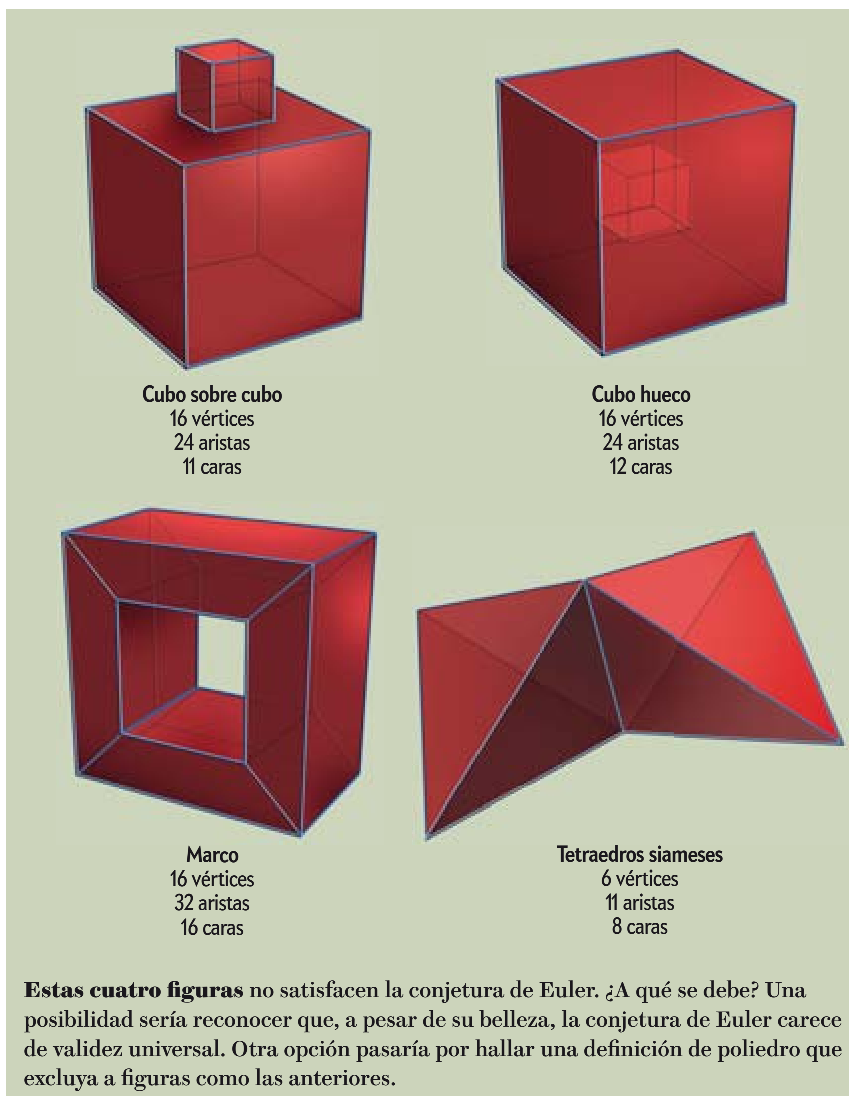
Nótese que cada vez que trazamos una diagonal estamos añadiendo una arista y una cara a la figura original. Por tanto, el valor de $V - A + C$ sigue siendo el mismo.

Ahora, procederemos a suprimir los triángulos de uno en uno. Si se trata de un triángulo que solo posee una arista exterior, suprimiremos dicha arista. Al eliminar cada una de esas aristas eliminamos también una cara triangular, por lo que tampoco modificamos el valor de $V - A + C$:



Por otro lado, si se trata de un triángulo con dos aristas exteriores, suprimiremos estas. En tal caso, además de las dos aristas, estamos eliminando una cara y un vértice, por lo que el valor de $V - A + C$ continúa inalterado:





Estas cuatro figuras no satisfacen la conjetura de Euler. ¿A qué se debe? Una posibilidad sería reconocer que, a pesar de su belleza, la conjetura de Euler carece de validez universal. Otra opción pasaría por hallar una definición de poliedro que excluya a figuras como las anteriores.

Es posible proceder de la manera descrita hasta que tan solo nos quede un triángulo. Todo triángulo satisface que $V - A + C = 1$; por tanto, si añadimos la cara exterior que habíamos suprimido al principio, obtenemos que $V - A + C = 2$.

Contraejemplos

Aunque solo hemos ilustrado el ejemplo del cubo, el argumento de Cauchy parece sumamente general. Dado cualquier poliedro, se diría que siempre es posible aplicar la misma cadena de pasos para llegar al mismo resultado.

Aunque pueda resultar tentador deducir que todo poliedro verifica la fórmula de Euler, semejante conclusión no revelaría sino una gran falta de imaginación por nuestra parte. Lakatos dedica gran parte de su libro a examinar contraejemplos como los de la figura superior. ¿Se le ocurre un método general para generar otros poliedros que no satisfagan la conjetura de Euler?

La pregunta obvia en estos momentos es qué podemos concluir a partir de los contraejemplos anteriores. Tal y como explica el propio Lakatos, en ausencia de una definición precisa de poliedro, contamos con varias posibilidades. Sin ánimo de ser exhaustivo, tal vez merezca la pena destacar las siguientes.

En primer lugar, podríamos concluir que ninguno de los contraejemplos anteriores deberían clasificarse como poliedros, sino más bien como monstruosidades carentes de interés matemático. La conjetura de Euler es tan bella que merece gozar del estatus de teorema, aun si ello conlleva desterrar del mundo de los poliedros a algunas figuras. Pero ¿cómo definir un poliedro de manera que ejemplos como los anteriores queden excluidos? La clave consiste en identificar algún paso en

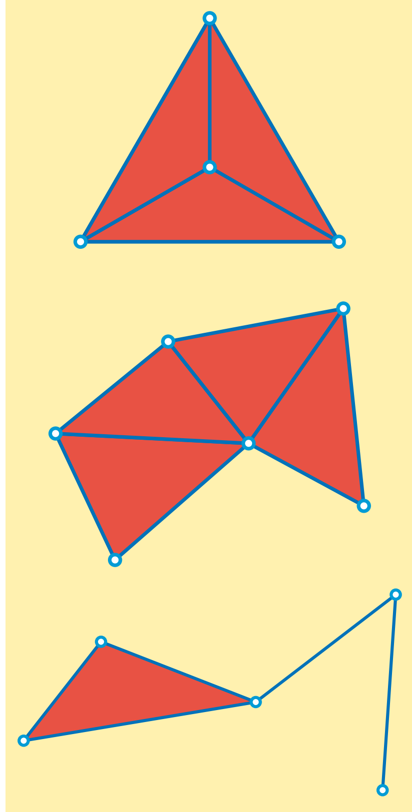
el razonamiento de Cauchy que no podamos llevar a cabo en tales casos.

Otra posibilidad consistiría en aceptar que los contraejemplos son poliedros, pero restringir la conjetura de Euler a un subconjunto de ellos. Este tipo de respuesta implica que existen muchos más poliedros que los que Euclides o Euler hubieran podido imaginar. Como en el caso anterior, necesitaríamos un examen exhaustivo de los argumentos como el esgrimido por Cauchy para extraer una caracterización del tipo de poliedro que verifica la conjetura de Euler.

Por último, podríamos admitir los contraejemplos como poliedros y buscar una generalización de la conjetura de Euler que resulte válida para todas las figuras. El problema reside en que la variedad de contraejemplos sugiere una gran dificultad a la hora de encontrar cuál habría de ser dicha generalización.

El teorema de Euler

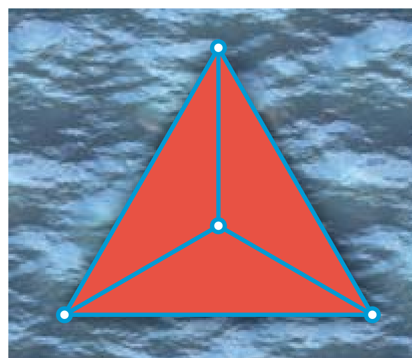
La razón por la que el argumento de Cauchy no funciona para los cuatro contraejemplos anteriores radica en que en ninguno de esos casos es posible dar el primer paso: suprimir una cara y proyectar el resto sobre el plano. Aunque Euler formulase



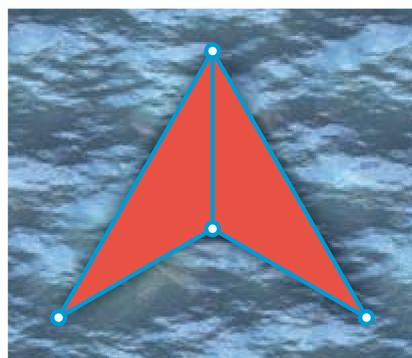
su conjetura como una observación sobre poliedros, hoy en día esta se tiene como un teorema sobre *grafos planares*.

Un *grafo* es una estructura compuesta por vértices unidos por líneas. Un grafo es *planar* si admite una proyección sobre el plano en la cual las líneas que unen sus vértices no se cruzan. En el caso del cubo, el resultado de suprimir una cara y proyectar el resto sobre un plano es, justamente, un grafo planar. Podemos pensar en los pasos siguientes del procedimiento de Cauchy como en un argumento destinado a demostrar que un grafo planar verifica que $V - A + C = 1$.

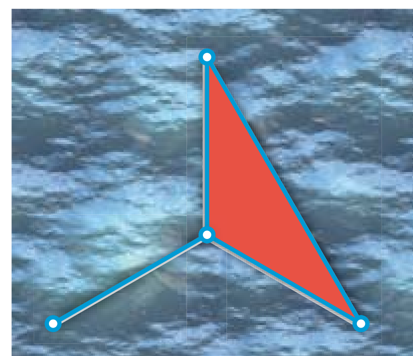
El argumento de Cauchy resulta muy intuitivo, pero tal vez merezca la pena describir otro que lo sea tanto o más. Pensemos en un grafo cuyos vértices se encuentran unidos por aristas que no se cruzan. Podemos imaginar que la superficie que rodea al grafo es el mar y que las aristas son diques que contienen el agua. Por ejemplo:

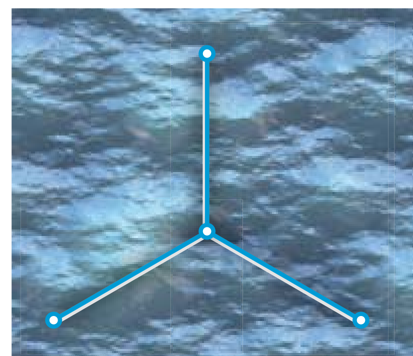


Ahora, procedemos como sigue. En primer lugar, suprimimos los diques exteriores de una cara interior para que esta se inunde. Al disminuir en uno tanto el número de aristas como el de caras, la diferencia $V - A + C$ permanece constante.



Ahora repetimos el procedimiento hasta que no quede ninguna cara interior:





El resultado del procedimiento anterior es un *árbol*: una figura que consiste en vértices unidos por aristas que no llegan a formar una cara. Si ahora suprimimos una arista, la diferencia $V - A + C$ permanece constante, ya que al mismo tiempo estamos suprimiendo un vértice. Si repetimos el procedimiento hasta que solo quede una arista, acabaremos con dos vértices y una arista, con lo que $V - A + C = 1$.

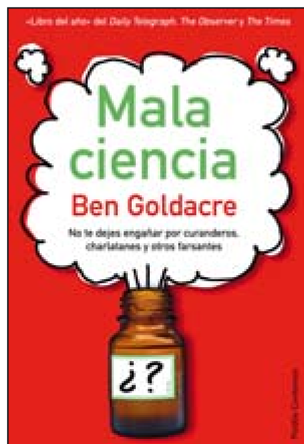
El hecho de que lo anterior se cumpla para grafos planares permite definir una clase especial de poliedros para los cuales sí se cumple la conjetura de Euler. Un poliedro *convexo* es uno tal que dos vértices cualesquiera siempre pueden unirse mediante un segmento interior al poliedro. Resulta sencillo comprobar que ninguno de los contraejemplos ilustrados arriba satisface esta condición.

Es posible demostrar que el primer paso del argumento de Cauchy puede aplicarse a todos los poliedros convexos, ya que su proyección sobre el plano resulta en un grafo planar. Dado que, en ese caso, el grafo cumple que $V - A + C = 1$, hemos demostrado que todos los poliedros convexos satisfacen la conjetura de Euler.

PARA SABER MÁS

Imre Lakatos discutió la característica de Euler en **Pruebas y refutaciones: La lógica del descubrimiento matemático**, Alianza Editorial, 1994.

David Eppstein ofrece diecinueve pruebas de la conjetura de Euler en **www.ics.uci.edu/~eppstein/junkyard/euler**



MALA CIENCIA.
Por Ben Goldacre. Colección Paidós Contextos. Espasa Libros S.L.U.; Madrid, 2011.

Falacias, patrañas y malas prácticas

¿Por qué tienen credibilidad social las terapias rechazadas por la ciencia?

No es fácil redactar la recensión de un libro cuyo autor duda de la función de los divulgadores científicos, cuando quien la redacta se considera divulgador vocacional y se ha de publicar en una revista de alta divulgación científica. El comentarista no se limita en este caso a estar implicado profesionalmente, sino también emocionalmente; los comentarios tendrán, por tanto, una componente emocional inevitable.

La obra es sensacional. Es el libro que a toda persona con preocupación por la baja cultura científica de sus conciudadanos le gustaría haber escrito. Para ello se deberían tener los conocimientos que demuestra el autor, su gracejo y desparpajo en redactar, y su valor al citar, con nombres y apellidos, a pseudocientíficos, empresas de productos milagrosos, farmacéuticas, medios de publicación no rigurosos... Y debería tenerse también la capacidad de resistir las presiones y querellas judiciales que el autor ha recibido por sus denuncias de malas prácticas.

Ben Goldacre es psiquiatra, periodista científico y colaborador de programas de radio y televisión. Además de ejercer la psiquiatría en el servicio nacional de sanidad británico, es autor de la columna semanal «*Bad Science*», en el periódico *The Guardian*, desde 2003. Mantiene su página web actualizada con los contenidos de su columna y otros materiales.

El objetivo del libro es denunciar las pseudociencias del sector sanitario —incluida la homeopatía—, los pseudocientíficos, las campañas sanitarias alarmistas, los periodistas inexpertos en el tratamiento de la información científica, los editores de periódicos que les dan cobijo, etcétera. Su autor se ha visto involucrado en diversos conflictos judiciales, porque no se limita a «decir el pecado y callarse el pecador», sino que lo denuncia con nombres y apellidos: entre otros Gillian McKeith, pescetariana, empresaria de pastillas y alimentos «mágicos», escritora de *best sellers* como *You are what you eat*, cuyo título se ha convertido en eslogan de muchos movimientos, y celebridad televisiva; Patrick Holford, fundador del Instituto para una Nutrición Óptima en Londres, basado en la *medicina ortomolecular* —con ideas de Linus Pauling, ay—, para la formación de *terapeutas nutricionales*, con recetas para curar el sida y el autismo; Matthias Ratt, empresario de pastillas de vitaminas y otros productos, que afirma curar con ellos el cáncer y el sida, y se ha introducido en diversos países africanos; *Brain Gym*, un movimiento de *gimnasia cerebral* fundado en California y muy introducido en las escuelas del Reino Unido; y un largo etcétera. De ser el autor de nuestro país, ¿qué ejemplos habría incluido en su libro?

La cuestión primera que Goldacre usa como base para juzgar la bondad o maldad de cualquier afirmación es siempre la misma: ¿Dónde se han publicado los resultados experimentales que demuestran lo que usted afirma? Evidentemente, en muy pocas ocasiones hay datos publicados en revistas con revisión externa, lo que excluye de la ciencia buena parte de los ejemplos que se citan en el libro.

Pero hay una segunda pregunta, para los casos en que sí existen publicaciones: ¿La investigación que ha sido publicada, está bien realizada? Ello da pie al autor a explayarse en el análisis de los principales sesgos que se introducen en las investigaciones médicas para evaluar la prevalencia de una enfermedad, demostrar la eficacia de un fármaco o de una terapia, o simplemente «colar» un artículo científico en una revista de alto índice de impacto. Explica con detalle conceptos estadísticos diversos, el efecto placebo, el efecto nocebo, la regresión a la media, los errores en la selección de la muestra, los sesgos introducidos por las expectativas puestas en el ensayo por parte del científico, etcétera. Son muy interesantes los detalles de las revisiones de la Colaboración Cochrane, fundada en 1993 para evitar los sesgos en la evaluación de la eficacia de los tratamientos.

De su crítica no se libra, desde luego, la homeopatía, con un amplio y minucioso capítulo. Tampoco las farmacéuticas, a las que acusa de presentar los resultados de sus pruebas de fármacos de manera sesgada, de publicar solo si los resultados son positivos (sesgo de publicación), publicar por duplicado conjuntos de resultados para provocar la sobreestimación de la eficacia de un medicamento, u ocultar efectos secundarios. Todas las afirmaciones se respaldan mediante citas sobre las fuentes de información utilizadas, por si el lector quiere entretenerse en su corroboración.

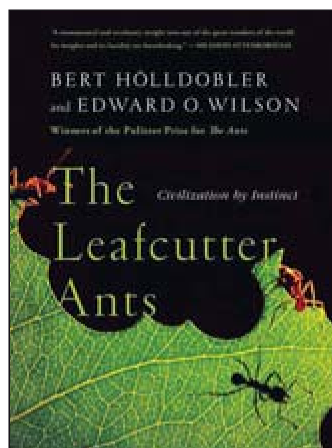
El libro es especialmente crítico con las noticias científicas erróneas o absurdas que se publican en los medios de comunicación. Y se basa en la hipótesis de que «las personas que dirigen los medios de comunicación son titulados en áreas de humanidades con escasos conocimientos sobre ciencia, que, además, se enorgullecen de su ignorancia en la materia». Podrá o no ser cierta tal hipótesis y podrá o no ser esta el origen de la baja calidad de gran parte de la información científica publicada, pero el hecho es que el autor suministra un buen número de ejemplos de noticias de ciencia erróneas, que clasifica en historias descabelladas, «avances» de trascendencia histórica y noticias «alarmistas». Atribuye buena parte de tales errores a actividades promocionales de compañías de todo tipo disfrazadas de información científica o tecnológica. Y detalla dos casos de creación de climas sociales de alarmismo sanitario: el SARM o estafilococo áureo resistente a la meticilina, generado por investigaciones erróneas que los periodistas daban por buenas; y el caso de la vacuna triple vírica, a la que cierto médico atribuyó una conexión con los casos de autismo, lo que desató una campaña mediática para suprimir su uso en Gran Bretaña.

En el último capítulo, Goldacre da consejos a los que querrían cambiar ese estado de cosas mejorando la calidad de la ciencia publicada en los medios. Consejos en cierto modo desencantados: «Jamás podréis impedir que los periódicos publiquen estupideces, pero sí podéis añadir vuestra dosis de sensatez a la mezcla. Enviad correos electrónicos [...], escribid al director, al periodista, a la sección de cartas de los lectores...». Apostrofa contra la simpli-

ficación excesiva y la idiotización de los contenidos de las personas que se dedican a la popularización de la ciencia. Es en este momento cuando me siento culpable de pretender divulgar la ciencia. Pero el autor termina por salvarnos: no critica a los científicos divulgadores, sino a los divulgadores sin titulación. Menos mal.

El libro ha sido traducido de forma competente y con una prosa excelente por Albino Santos Mosquera.

—*Claudi Mans*



THE LEAFCUTTER ANTS. CIVILIZATION BY INSTINCT.

Dirigido por Bert Hölldobler y Edward O. Wilson. W. W. Norton & Company; Nueva York, 2010.

Hormigas cortadoras de hojas

El superorganismo supremo

El término *superorganismo* refleja una manera de entender la naturaleza de la sociedad. Se aplica a aquellas sociedades de insectos sociales que poseen características de organización comparable a las propiedades fisiológicas de un organismo simple. En esta obra, los autores logran argumentar de forma muy clara e ilustrada los motivos que hacen que las colonias de hormigas cortadoras de hojas merezcan ser consideradas una de las siete maravillas del mundo animal, otorgándoles el no exagerado calificativo de *superorganismo supremo*. Asimismo, los autores asemejan las colonias de hormigas cortadoras de hojas a las sociedades humanas como las «más grandes y complejas sociedades animales de la Tierra», asumiendo que estas colonias de insectos son más que la suma de sus partes.

Las hormigas cortadoras de hojas reciben tales «halagos» tanto por su sistema de comunicación, el más complejo conocido en el mundo animal, como por su elaborado sistema de castas y división del trabajo, la arquitectura de sus nidos con sistemas especializados de refrigeración y sus poblaciones con millones de obreras. Todos estos aspectos se analizan minuciosamente en esta obra.

El libro presta también especial atención a la descripción del mecanismo mutualista hormiga-hongo, en el cual se basa el éxito de estas sociedades. Las hormigas cultivan sus hongos en las cámaras interiores de los nidos, alimentándolos sobre todo con hojas recién cortadas y manteniéndolos libres de plagas y otros hongos. El hongo necesita el cuidado de las hormigas para su propia supervivencia, y las larvas de las hormigas se alimentan del hongo. Este sistema de cultivo, fuertemente análogo a la agricultura humana, ha ido evolucionando de modo que dentro de este grupo de hormigas las especies filogenéticamente más evolucionadas presentan una asociación íntima con el hongo más compleja y eficiente. Para ilustrar la elevada complejidad de la simbiosis, los autores esclarecen que a esta se le añade otra pareja simbiótica, una bacteria que crece en las hormigas y segrega ciertas sustancias, con lo que se puede decir que las hormigas utilizan antibióticos para cuidar a su íntimo socio. Todo esto sucede en una sociedad dominada por hembras, donde a pesar de que los machos ejercen una función reproductora muy importante, aparecen solo estacionalmente. Y estas sociedades complejas son el resultado de más de 120 millones de años de historia evolutiva desde que aparecieron las primeras especies de hormigas, que han transcurrido con un único objetivo: la perpetuación de la especie.

A través de varios ejemplos, los autores también proporcionan una rápida y muy comprensible visión de la repercusión de estas hormigas sobre los ecosistemas naturales, que les ha llevado a dominar ecológicamente los bosques y praderas de las regiones tropicales y subtropicales del Nuevo Mundo. Seguramente, a muchos de los lectores les parecerá asombroso que una colonia de hormigas cortadoras de hojas pueda llegar a consumir la misma cantidad de materia vegetal que una vaca; que la superficie que ocupa el nido de las colonias más evolucionadas pueda ser similar a la superficie de nuestras casas, y que una colonia pueda tener la misma «huella ecológica» que la de una persona en un país desarrollado. Así, a pesar de la admiración que pueda despertar la organización de estas auténticas civilizaciones diminutas, también se debe considerar su faceta dañina, ya que constituyen las principales plagas de la agricultura y jardinería en gran parte de la América tropical.

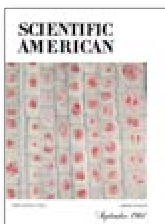
El presente libro tiene, por un lado, un gran valor científico, dado que es la más extensa revisión científica sobre hormigas cortadoras de hojas y, posiblemente, sobre cualquier otro grupo de hormigas. Aunque la bibliografía dedicada a las hormigas es bastante amplia, la mayoría de las obras son ensayos generales sobre la biología, la ecología o el comportamiento de estos insectos, u obras sobre aspectos concretos de algún grupo de hormigas. Gracias a la creciente investigación sobre hormigas cortadoras de hojas, estrechamente relacionada con la admiración que este grupo de insectos ha despertado en científicos y naturalistas en las últimas décadas, los autores han elaborado este libro puntero en el campo. Y aunque ya he comentado que muchos de los detalles resultan sorprendentes, lo que realmente realza esta obra es el modo en que todos estos detalles están unidos.

Por otro lado, el libro presenta un cierto carácter divulgativo que lo hace también legible para un público amplio. A pesar de estar escrita en un lenguaje bastante técnico, la obra se completa con un glosario de tecnicismos básicos en mirmecología, que seguramente son de gran ayuda para la audiencia menos especializada. El texto está también complementado con unas magníficas imágenes de gran calidad y muy apropiadas para ilustrar el texto. Por fin, termina con la bibliografía especializada sobre el tema a partir de la cual se ha desarrollado esta revisión, muy útil para aquellos que quieran profundizar sobre algún aspecto concreto de los detalles intrínsecos a esta complejidad estructural y funcional de la naturaleza.

En definitiva, esta es la más grande «biografía» de las hormigas cortadoras de hojas y otra obra de arte de B. Hölldobler y E. O. Wilson, ganadores del premio Pulitzer (1991) con el libro *The Ants* (1990), publicación de referencia básica para cualquier mirmecólogo o apasionado del mundo de las hormigas.

—*Xavi Arnan*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

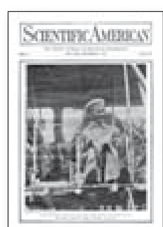


Septiembre 1961

El habla de las neuronas

«Hasta aquí nada hemos dicho acerca de la inhibición, pese a que en ella interviene todo el sistema nervioso y constituye una de las funciones más curiosas de la actividad nerviosa. La inhibición tiene lugar cuando un impulso nervioso actúa como freno sobre la célula siguiente. Con ello se impide que esta sea activada por señales excitadoras que pudieran llegar al mismo tiempo por otras vías. Los impulsos que viajan por los axones inhibidores no son eléctricamente distinguibles de los que viajan por los axones excitadores. Pero los efectos fisicoquímicos que producen en las sinapsis deben ser por fuerza de naturaleza diferente.
—Bernhard Katz»

Katz compartió el premio Nobel de medicina de 1970.



Septiembre 1911

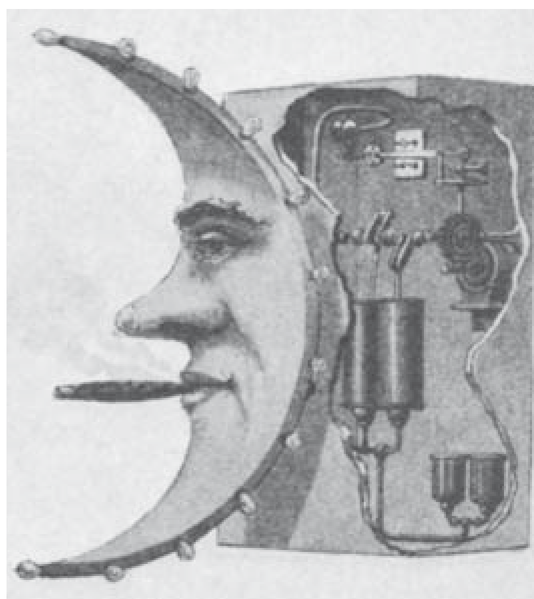
La turbina de Tesla

«A nuestros lectores les interesará saber que Nikola Tesla, cuya reputación se cimentó, por supuesto, en sus contribuciones a la ingeniería eléctrica cuando esta se hallaba aún en su infancia, es ingeniero mecánico fruto del aprendizaje y de la propia decisión. Durante varios años ha dedicado gran parte de su atención a mejorar la conversión termodinámica; el resultado de sus teorías y experimentos prácticos se tradujo en la aparición de una forma nueva de generadores de energía. En pocas palabras, el motor de Tesla y su equipo consisten en un conjunto de discos de acero planos montados en un árbol que giran dentro de una camisa, y por cuya periferia penetra vapor a gran velocidad; este fluye libre entre los discos describiendo espirales, para al final salir por el orificio de escape que se halla en el centro. Tesla aprovecha las propiedades de los fluidos de adherencia y viscosidad (la atracción entre el vapor y las caras de los discos) para transmitir la energía cinética del fluido motriz a las placas y al árbol.»

NOTA: Las finas placas de acero no pudieron soportar los elevados valores de temperatura y velocidad. Materiales más nuevos, tales como la fibra de carbono o las cerámicas, podrían renovar el interés de este diseño compacto.

Publicidad para el tabaco

«La mayoría de la gente piensa que el indio de madera monopoliza la publicidad del tabaco, pero tiene una eventual competencia en unas figuras que aparentan fumar un puro. Este, sin embargo, es igualmente de imitación; su humo procede de un recipiente oculto de tabaco en combustión, que de forma intermitente es expulsado por los labios de la figura mediante unos fuelles. Uno de los más elaborados de esos anuncios corresponde a una figura de media luna, cuyo lado convexo se halla tachonado de lámparas incandescentes y con bombillas en el extremo del puro.»



La Luna que fuma: novedosa fantasía mecánica para promover la venta de puros, 1911.

Caballos y calor

«El Departamento de Salud de la ciudad de Nueva York, responsable de la recogida de caballos muertos, informó que durante los seis días de la canícula de julio murieron al día 171 caballos; 1026 en total. Esos caballos representan más de medio millón de dólares, que se esfumaron en una sola semana. Se estima que ese dinero permitiría pagar un número de vehículos eléctricos suficiente para realizar el mismo trabajo que los caballos, de una manera más eficiente y económica.»

Disciplina naval

«El mercante británico *Estrella de Oriente* se perdió en la travesía de Bombay a Liverpool a causa de una colisión en el canal de Mozambique. En la investigación oficial sobre esa pérdida, el primer testigo fue el velero del barco, quien declaró que, cuando la embarcación chocó, se hallaba a cosa de una milla de la costa. Tras lo cual, el señor Tyndall, representante legal del Ministerio de Comercio, le dijo, "¿No pensó que era extraño que el barco se encontrara tan cerca de la costa?" A lo que el testigo respondió: "A nosotros no se nos permite pensar; a bordo de un barco solo tienen permiso para hacerlo el cocinero y el capitán." La respuesta no admitía réplica y el representante de sus señorías, tras aquella sucinta exposición de la ley del mar, no hizo más interrupciones.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CV, N.º 14; 30 DE SEPTIEMBRE DE 1911



Septiembre 1861

La cocaína, aislada

«El farmacéutico y químico alemán doctor Niemann ha venido realizando experimentos con hojas de coca, de las que ha obtenido un alcaloide para el cual propone el nombre de cocaína. La cocaína pura es incolora; sus cristales son prismáticos y de buen tamaño. Su reacción es alcalina, su gusto amargo; colocada sobre la lengua provoca la secreción de saliva y una sensación de frío. Varios farmacéuticos y médicos alemanes recomiendan las hojas de coca como sustituto del café en los ejércitos europeos, habida cuenta de las bien conocidas cualidades de la coca para conservar la vitalidad y el vigor durante un tiempo considerable sin la alimentación ordinaria.»

ANTROPOLOGÍA

La evolución de los ancianos

Rachel Caspari

En la gente mayor puede radicar el éxito de nuestra especie.



NEUROCIENCIA

Cómo potenciar el aprendizaje

Gary Stix

Estudios del cerebro apuntan nuevas formas de mejorar la lectura, la escritura, la aritmética e incluso las destrezas sociales.

MEDICINA

Una bocanada de aire fresco

Steven M. Rowe, J. P. Clancy y Eric J. Sorscher

Ahondar en la biología básica ha facilitado el desarrollo de nuevos tratamientos contra la fibrosis quística.



COSMOLOGÍA

¿Existe realmente el multiverso?

George F. R. Ellis

Demostrar la existencia de universos paralelos distintos al nuestro se halla todavía fuera del alcance de la ciencia.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

José Manuel García de la Mora: *Los límites de la inteligencia*; Yago Ascasibar: *La tabla periódica de las estrellas*; Fabio Teixidó: *Viaje al manto terrestre, El último gran calentamiento global* y *Túneles de lava*; Joandomènec Ros: *La evolución del ojo* y *Peces cavernícolas*; Luis Bou: *Foro científico*; Juan Manuel González Mañas: *El olfato de los mosquitos*; Tanja Sachse: *Tras el enlace*; Angel Garcimartín: *Los límites del conocimiento*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Revoltijo de ratones*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España